



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

**Analisi LCA di un edificio residenziale  
a basso consumo energetico**

Relatore: Prof.ssa Anna Stoppato

Laureando: Davide Fantinato  
Matricola n. 1152902

Anno Accademico 2017/2018



# Indice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Sommario .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>Introduzione .....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>Capitolo 1 - La metodologia Life Cycle Assessment .....</b>     | <b>5</b>  |
| 1.1 Origini e definizione .....                                    | 5         |
| 1.2 Struttura .....  | 7         |
| 1.2.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione ..... | 8         |
| 1.2.2 Analisi di inventario .....                                  | 10        |
| 1.2.3 Analisi degli impatti .....                                  | 11        |
| 1.2.4 Interpretazione e miglioramento .....                        | 13        |
| <b>Capitolo 2 - La valutazione ambientale degli edifici .....</b>  | <b>15</b> |
| 2.1 Introduzione .....   | 15        |
| 2.2 I sistemi di valutazione multicriterio a punteggio .....       | 16        |
| 2.3 LCA in edilizia .....  | 20        |
| 2.3.1 Quadro normativo .....                                       | 22        |
| 2.3.2 Analisi bibliografica .....                                  | 24        |
| <b>Capitolo 3 - Il software SimaPro .....</b>                      | <b>31</b> |
| 3.1 Obiettivo ed ambito .....                                      | 32        |
| 3.2 Inventario .....   | 34        |
| 3.2.1 Processi .....   | 34        |
| 3.2.2 Fasi del prodotto .....                                      | 35        |
| 3.3 Valutazione dell'impatto .....                                 | 36        |
| 3.3.1 Metodi .....   | 36        |
| 3.3.2 Impostazioni di calcolo .....                                | 40        |
| 3.4 Interpretazione .....  | 41        |
| <b>Capitolo 4 - Caso studio .....</b>                              | <b>43</b> |
| 4.1 Descrizione e collocazione dell'edificio .....                 | 43        |
| 4.2 Confini del sistema e unità funzionale .....                   | 45        |
| 4.3 Analisi di inventario .....                                    | 45        |
| 4.3.1 Fase di pre uso .....  | 46        |
| 4.3.1.1 Involucro .....  | 46        |
| 4.3.1.2 Impianti .....   | 57        |
| 4.3.1.3 Fase di costruzione .....                                  | 61        |
| 4.3.2 Fase d'uso .....   | 64        |
| 4.3.2.1 Fabbisogno di energia per riscaldamento .....              | 64        |
| 4.3.2.1.1 Costruzione del modello dell'edificio in TRNBuild .....  | 64        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.3.2.1.2 Simulazione dinamica in Simulation Studio.....  | 70         |
| 4.3.2.2 Consumo impianto di ventilazione meccanica controllata.....                               | 72         |
| 4.3.2.3 Fabbisogno di energia per la produzione di acqua calda sanitaria .....                    | 72         |
| 4.3.2.4 Usi elettrici obbligati .....   | 76         |
| 4.3.2.5 Consumi uso cucina .....  | 77         |
| 4.3.3 Fine vita .....   | 78         |
| <b>4.4 Analisi degli impatti ed interpretazione dei risultati .....</b>                           | <b>83</b>  |
| 4.4.1 Metodo Cumulative Energy Demand (CED).....  | 83         |
| 4.4.2 Metodo Eco-indicator 99 (H) .....   | 87         |
| 4.4.3 Metodo EDIP 2003.....   | 94         |
| 4.4.4 Analisi di un diverso modello di edificio: integrazione di un impianto fotovoltaico.....    | 97         |
| 4.4.5 Analisi di un diverso modello di edificio: isolamento a cappotto in EPS riciclato .....     | 102        |
| 4.4.6 Analisi di un diverso modello di edificio: durata di vita dell'edificio pari a 50 anni..... | 104        |
| 4.4.7 Analisi di un diverso modello di edificio: distanza media trasporti pari a 80 km .....      | 105        |
| <b><i>Conclusioni</i> .....</b>   | <b>107</b> |
| <b><i>Appendice</i> .....</b>   | <b>109</b> |
| <b><i>Bibliografia</i>.....</b>   | <b>119</b> |

# Indice delle figure

|  |    |
|--|----|
| Fig. 1.2.1 Fasi e principali applicazioni dirette di un'analisi LCA.....   | 7  |
| Fig. 1.2.3.1 Elementi obbligatori ed elementi opzionali della fase LCIA.....   | 12 |
| Fig. 2.3.1 Fasi del ciclo di vita di un edificio secondo la norma EN 15978.....  | 21 |
| Fig. 2.3.1.1 Quadro di sintesi dei lavori normativi in ambito CEN relativi alla sostenibilità degli edifici.....                     | 24 |
| Fig. 2.3.2.1 Articoli scientifici relativi alla metodologia LCA in edilizia, pubblicati dal 2011 al 2015.....                        | 24 |
| Fig. 2.3.2.2 Energia incorporata e relativa alla fase d'uso per diverse tipologie edilizie.....                                      | 27 |
| Fig. 3.2.2.1 Finestra del software SimaPro 8.0.3.14 relativa alla sezione "Fasi del Prodotto".....                                   | 35 |
| Fig. 3.3.1.1 Struttura del metodo Eco-indicator 99.....  | 39 |
| Fig. 4.1.1 Planimetria piano terra.....  | 43 |
| Fig. 4.1.2 Vista Sud.....  | 43 |
| Fig. 4.3.2.1.1 Modello tridimensionale dell'edificio; vista sud-ovest (a sinistra) e vista sud-est (a destra).....                   | 64 |
| Fig. 4.3.2.1.2 Interfaccia grafica di TRNBuild per la definizione di emisfero ed orientazioni delle superfici.....                   | 65 |
| Fig. 4.3.2.5.1 Consumi elettrici in fase d'uso.....  | 77 |
| Fig. 4.4.1.1 Rappresentazione ad albero dell'intero ciclo di vita analizzato con il metodo Cumulative Energy Demand; Cut-off 5%..... | 83 |
| Fig. 4.4.1.2 Analisi di contributo assembly "Involucro" con metodo Cumulative Energy Demand.....                                     | 84 |
| Fig. 4.4.1.3 Analisi di contributo materiali involucro con metodo Cumulative Energy Demand.....                                      | 85 |
| Fig. 4.4.1.4 Analisi di contributo assembly "Impianti" con metodo Cumulative Energy Demand.....                                      | 85 |
| Fig. 4.4.1.5 Analisi di contributo materiali impianti con metodo Cumulative Energy Demand  | 86 |
| Fig. 4.4.2.1 Analisi intero ciclo di vita con metodo Eco-indicator 99; Caratterizzazione.....  | 88 |
| Fig. 4.4.2.2 Analisi intero ciclo di vita con metodo Eco-indicator 99; Punteggio singolo.....  | 89 |
| Fig. 4.4.2.3 Rappresentazione ad albero dell'intero ciclo di vita analizzato con il metodo Eco-indicator 99; Cut-off 5%.....         | 90 |

|   |     |
|---|-----|
| Fig. 4.4.2.4 Analisi di contributo materiali involucro con metodo Eco-indicator 99.....   | 91  |
| Fig. 4.4.2.5 Composizione percentuale in massa dell'involucro edilizio.....   | 91  |
| Fig. 4.4.2.6 Analisi di contributo assembly "Involucro" con metodo Eco-indicator 99; Caratterizzazione.....   | 92  |
| Fig. 4.4.2.7 Rappresentazione ad albero assembly "Impianti" analizzata con il metodo Eco-indicator 99; Cut-off 5%.....  | 93  |
| Fig. 4.4.3.1 Rappresentazione ad albero dell'intero ciclo di vita realizzato con il metodo EDIP 2003; Cut-off 5%.....   | 94  |
| Fig. 4.4.3.2 Analisi intero ciclo di vita con metodo EDIP 2003; Caratterizzazione.....  | 95  |
| Fig. 4.4.3.3 Analisi dell'intero ciclo di vita con il metodo EDIP 2003; Punteggio singolo.....  | 96  |
| Fig. 4.4.4.1 Rappresentazione ad albero dell'intero ciclo di vita (con impianto PV) analizzato con il metodo Cumulative Energy Demand; Cut-Off 5%.....        | 98  |
| Fig. 4.4.4.2 Rappresentazione ad albero dell'intero ciclo di vita (con impianto PV) analizzato con il metodo Eco-indicator 99; Cut-Off 5% .....               | 99  |
| Fig. 4.4.4.3 Fig. 4.4.4.3 Rappresentazione ad albero assembly "Impianti" (con impianto PV) analizzata con il metodo Cumulative Energy Demand; Cut-Off 5%..... | 99  |
| Fig. 4.4.4.4 Fig. 4.4.4.3 Rappresentazione ad albero assembly "Impianti" (con impianto PV) analizzata con il metodo Eco-indicator 99; Cut-Off 5%.....         | 100 |

# Indice delle tabelle

|   |    |
|---|----|
| Tab. 2.3.2.1 Alcuni articoli scientifici relativi alla Life Cycle Assessment applicata all'edificio..                             | 28 |
| Tab. 3.2.1 Dati da inserire nei processi.....   | 34 |
| Tab. 3.3.1.1 Comportamenti ed opinioni alla base del sistema di valori utilizzato in Eco-indicator 99.....                        | 37 |
| Tab. 4.1.1 Temperature medie mensili per Padova.....  | 44 |
| Tab. 4.1.2 Irradiazione solare media mensile [MJ/m <sup>2</sup> ] su superficie verticale per Padova.....                         | 45 |
| Tab. 4.3.1.1.1 Materiali fondazioni.....  | 46 |
| Tab. 4.3.1.1.2 Materiali piano interrato.....   | 46 |
| Tab. 4.3.1.1.3 Materiali solai e scala interna.....   | 47 |
| Tab. 4.3.1.1.4 Materiali strutture portanti.....  | 47 |
| Tab. 4.3.1.1.5 Materiali strutture muri divisorii.....  | 47 |
| Tab. 4.3.1.1.6 Materiali terrazzo.....  | 48 |
| Tab. 4.3.1.1.7 Materiali copertura.....   | 48 |
| Tab. 4.3.1.1.8 Materiali infissi.....   | 49 |
| Tab. 4.3.1.1.9 Materiali rivestimento ed isolamento.....  | 49 |
| Tab. 4.3.1.1.10 Materiali pavimentazione.....   | 50 |
| Tab. 4.3.1.1.11 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità e tipo di rifiuto materiali involucro.....          | 51 |
| Tab. 4.3.1.2.1 Materiali impianto idrico sanitario.....   | 57 |
| Tab. 4.3.1.2.2 Materiali impianto elettrico.....  | 57 |
| Tab. 4.3.1.2.3 Materiali impianto termico.....  | 58 |
| Tab. 4.3.1.2.4 Materiali impianto di ventilazione meccanica controllata.....  | 58 |
| Tab. 4.3.1.2.5 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità e tipo di rifiuto materiali impianti.....            | 59 |
| Tab. 4.3.1.3.1 Consumi fase di costruzione.....   | 61 |
| Tab. 4.3.1.3.2 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità consumi cantiere.....                                | 61 |
| Tab. 4.3.1.3. Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità trasporti cantiere.....                               | 61 |
| Tab. 4.3.1.3.3 Materiali impianto idrico sanitario.....   | 61 |
| Tab. 4.3.1.3.4 Tipo di trasporto, efficienza di messa in opera e relative perdite di processo per i materiali dell'involucro..... | 62 |

|   |     |
|---|-----|
| Tab. 4.3.1.3.5 Tipo di trasporto, efficienza di messa in opera, e relative perdite di processo per i materiali degli impianti.....                          | 63  |
| Tab. 4.3.2.1.1.1 Stratigrafia parete perimetrale.....   | 67  |
| Tab. 4.3.2.1.1.2 Stratigrafia parete interna.....   | 68  |
| Tab. 4.3.2.1.1.3 Stratigrafia solaio contro terra.....  | 68  |
| Tab. 4.3.2.1.1.4 Stratigrafia solaio interpiano.....  | 69  |
| Tab. 4.3.2.1.1.5 Stratigrafia tetto.....  | 69  |
| Tab. 4.3.2.3.1 Dati per il calcolo fabbisogno ACS secondo UNI 11300-2.....  | 72  |
| Tab. 4.3.2.3.2 Dati di default per calcolo produzione del sistema solare.....   | 74  |
| Tab. 4.3.2.3.3 Calcolo produzione ACS collettori solari.....  | 75  |
| Tab. 4.3.2.4.1 Calcolo usi elettrici obbligati.....   | 76  |
| Tab. 4.3.2.5.1 Consumi elettrici fase d'uso.....  | 77  |
| Tab. 4.3.3.1 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità demolizione selettiva.....   | 78  |
| Tab. 4.3.3.2 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità demolizione controllata.....   | 78  |
| Tab. 4.3.3.3 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità trattamento macerie.....   | 79  |
| Tab. 4.3.3.4 Consumi energetici fase di fine vita.....  | 79  |
| Tab. 4.3.3.5 Destinazioni di fine vita e flussi percentuali dei vari materiali.....   | 80  |
| Tab. 4.3.3.6 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità e tipo di rifiuto fine vita (processi di riciclo e riuso).....                   | 81  |
| Tab. 4.3.3.7 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità e tipo di rifiuto fine vita (processi di smaltimento e termovalorizzazione)..... | 82  |
| Tab. 4.4.2.1 Analisi ciclo di vita con metodo Eco-indicator 99; Caratterizzazione.....  | 85  |
| Tab. 4.4.2.2 Analisi ciclo di vita con metodo Eco-indicator 99; Caratterizzazione.....  | 85  |
| Tab. 4.4.2.3 Analisi ciclo di vita con metodo Eco-indicator 99; Punteggio singolo.....  | 86  |
| Tab. 4.4.3.1 Analisi ciclo di vita con metodo EDIP 2003; Caratterizzazione.....   | 92  |
| Tab. 4.4.4.1 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità impianto fotovoltaico.....   | 95  |
| Tab. 4.4.4.2 Confronto impatti senza impianto fotovoltaico e con impianto fotovoltaico.....   | 95  |
| Tab. 4.4.5.1 Dati relativi alle due tipologie di isolanti.....  | 102 |
| Tab. 4.4.5.2 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità e tipo di rifiuto EPS.....   | 103 |



|  |     |
|--|-----|
| Tab. 4.4.5.3 Confronto impatti energetici ed ambientali nel ciclo di vita con isolamento in sughero e con isolamento in EPS riciclato..... | 103 |
| Tab. 4.4.6.1 Confronto impatti energetici ed ambientali nel ciclo di vita per due diverse durate di vita dell'edificio.....                | 104 |
| Tab. 4.4.7.1 Confronto impatti energetici ed ambientali nel ciclo di vita per due ipotesi di distanza media per i trasporti.....           | 105 |



# Sommario

Negli ultimi anni la normativa europea e quella nazionale in ambito di certificazione energetica degli edifici, hanno orientato il settore delle costruzioni verso un crescente contenimento dei fabbisogni energetici.

La diffusione di edifici che presentano un ridotto (o quasi nullo) consumo energetico in fase d'uso spinge a riconsiderare il peso in termini di impatti energetici ed ambientali associato alle diverse fasi che caratterizzano il ciclo di vita di un edificio.

A tale scopo l'analisi LCA (Life Cycle Assessment), metodologia riconosciuta a livello internazionale per la valutazione affidabile delle prestazioni energetico-ambientali, rappresenta un utile strumento per determinare le fasi e i componenti più impattanti del ciclo vita di un organismo edilizio.

Nella prima parte dell'elaborato di tesi, è stata approfondita la metodologia LCA e le sue peculiarità nell'applicazione al settore edilizio. Sono stati inoltre descritti i principali sistemi di valutazione ambientale degli edifici e la normativa di riferimento. È stata poi riportata un'analisi della letteratura ed una descrizione del software e dei metodi utilizzati nel caso studio.

Nella seconda parte dell'elaborato, è stata svolta un'analisi LCA mediante il software SimaPro di un edificio residenziale a basso consumo energetico. I dati relativi all'edificio oggetto dello studio, in particolare per quanto riguarda la fase di costruzione e fine vita, sono stati ricavati da uno studio presente in letteratura. I dati relativi alla fase d'uso sono stati ottenuti da dati statistici, simulazioni energetiche e da altri studi presenti in letteratura.

Sono state considerate la fase di pre uso (produzione, trasporto, messa in opera e manutenzione dei materiali), la fase d'uso (fabbisogni energetici dell'edificio) e la fase di fine vita (demolizione selettiva, trasporto, trattamento e smaltimento dei rifiuti).

Per la valutazione degli impatti sono stati utilizzati il metodo Cumulative Energy Demand, il metodo Eco-indicator 99 ed il metodo EDIP 2003.

Infine, sono stati valutati gli effetti di diverse modifiche al modello dell'edificio analizzato. In particolare sono stati quantificati i benefici energetici ed ambientali relativi all'installazione di un impianto fotovoltaico per la copertura dei consumi di energia elettrica in fase d'uso.



# Introduzione

Il settore delle costruzioni se da un lato riveste un ruolo di primo piano in termini economici e sociali, dall'altro è responsabile di un elevato impatto sull'ambiente, in termini di consumo di materie prime, consumo di energia, emissioni in atmosfera, produzione di rifiuti.

Nell'Unione Europea l'edilizia è responsabile di circa il 42% dei consumi finali di energia e del 50% delle materie prime, produce circa il 35% delle emissioni di gas climalteranti e il 50% dei rifiuti [16], [17]. Tali impatti sono attribuibili principalmente al comparto residenziale (che rappresenta circa il 46% del patrimonio edilizio complessivo) [18].

In questo contesto, con la Direttiva n. 2010/31/EU sulla prestazione energetica dell'edilizia (EPBD recast), l'Unione Europea “si è impegnata ad elaborare un sistema energetico sostenibile, competitivo, sicuro e decarbonizzato entro il 2050”; in particolare tale direttiva prevede che entro 31 dicembre 2020 (entro 31 dicembre 2018 per gli edifici pubblici) tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno essere “edifici a energia quasi zero” [19]. Inoltre nell'ultima revisione della direttiva, entrata in vigore a luglio 2018, si evidenzia come ogni stato membro ha il compito di individuare “una strategia a lungo termine per sostenere la ristrutturazione del parco nazionale di edifici residenziali e non residenziali, sia pubblici che privati, al fine di ottenere un parco immobiliare decarbonizzato e ad alta efficienza energetica entro il 2050, facilitando la trasformazione efficace in termini di costi degli edifici esistenti in edifici a energia quasi zero” [20].

Sotto la spinta normativa, nel corso degli anni si sono sviluppati diversi approcci per la realizzazione di edifici a basso consumo energetico che prevedono l'adozione di tecnologie passive, tecnologie attive o una combinazione di esse. Tuttavia un aspetto che accomuna le diverse soluzioni costruttive innovative è che la riduzione del fabbisogno di energia nella fase d'uso è ottenuta con un aumento nell'impiego di materiali, in particolare materiali ad alta intensità energetica, sia nell'involucro sia negli impianti. [21]

Negli edifici a basso consumo energetico, il consumo energetico in fase d'uso è talmente ridotto che le altre fasi, in particolare quelle di produzione dei materiali e di manutenzione dell'edificio, assumono una rilevanza sempre maggiore. La valutazione della sostenibilità di un edificio non può più quindi essere circoscritta al solo ambito del risparmio energetico, ma richiede un allargamento degli obiettivi al fine di individuare il punto ottimale tra la riduzione del consumo in fase d'uso e l'aumento degli impatti relativi alle altre fasi connesse al miglioramento prestazionale. [3]

Per ottenere un approccio organico e completo della valutazione del danno ambientale relativo all'edificio, è necessario utilizzare un metodo oggettivo e affidabile.

L'analisi LCA (Life Cycle Assessment) è oggi il metodo di valutazione maggiormente accreditato a livello internazionale per la quantificazione del danno ed i suoi esiti possono essere immediatamente correlati agli impatti sulla salute umana, sulla qualità degli ecosistemi e sul consumo delle risorse naturali [9].

L'applicazione della metodologia LCA in edilizia diventa quindi sempre più fondamentale nella fase di progettazione dell'organismo edilizio, e soprattutto riveste primaria importanza in termini di affidabilità e rilevanza dei risultati, anche quando è impiegata a supporto dei processi decisionali per la definizione di politiche strategiche nel settore [3].

# Capitolo 1

## La metodologia Life Cycle Assessment

### 1.1 Origini e definizione

L'origine della metodologia LCA (acronimo di Life Cycle Assessment) può essere fatta risalire agli inizi degli anni Sessanta con la pubblicazione di studi riguardanti i carichi energetici associati ad alcune produzioni industriali.

Secondo Vigon et al. (1993) uno dei primi studi nell'ambito LCA, riguardante il fabbisogno di energia complessivo per la produzione di intermedi e prodotti chimici, fu presentato nel 1963 alla World Energy Conference da Harold Smith.

Nel decennio successivo, il problema dell'esauribilità di materie prime e risorse energetiche incoraggiò studi più approfonditi, focalizzati principalmente sull'ottimizzazione della gestione delle risorse energetiche [1].

Tra la fine degli anni Sessanta e l'inizio degli anni Settanta, si verificò una progressiva transizione da analisi incentrate principalmente sui consumi energetici ad analisi che tenevano in considerazione sia il consumo di materie prime che di risorse energetiche; rappresentativi di questo periodo sono due importanti report nei quali si cercava di predire quali sarebbero stati gli effetti di un aumento della popolazione mondiale sulla richiesta di materie prime e di energia: "The Limits to Growth" (Meadows et al. , 1972) e "A Blueprint for Survival" (Goldsmith et al., 1972).

Sempre in questo periodo fu introdotto, in particolare negli Stati Uniti, il concetto di "analisi del profilo ambientale e delle risorse" che consentiva di seguire la filiera produttiva dall'estrazione delle materie prime utilizzate sino allo smaltimento, secondo l'approccio "from cradle to grave" (dalla culla alla tomba), quantificando l'uso di risorse e il rilascio di inquinanti in ambiente lungo tutto il ciclo di vita del prodotto [1].

Nel 1969 la Coca Cola Company avviò uno studio, commissionato dall'EPA (Environmental Protection Agency) al MRI (Midwest Research Institute), che può essere considerato un punto di riferimento nello sviluppo della metodologia LCA. L'obiettivo dello studio era quello di confrontare l'intero ciclo di vita di diverse tipologie di contenitore per bevande al fine di individuare la soluzione ottimale in termini richiesta di materie prime, richiesta di energia ed emissioni in ambiente: si passò così, per la prima volta, ad uno studio di prodotti e non più ai singoli processi industriali.

La quantificazione del consumo di risorse e degli impatti ambientali dei prodotti si sviluppò sotto il nome di REPA (Resource and Environmental Profile Analysis) negli Stati Uniti, mentre in Europa venne denominata Ecobilancio.

Verso la fine degli anni settanta, nacque il concetto di sviluppo sostenibile e nello stesso periodo in Europa venne pubblicato il manuale di analisi energetica industriale di Bounstead e Hancock, una pietra miliare nella storia della metodologia LCA in quanto fu il primo documento ad offrire una descrizione di carattere operativo del procedimento analitico che è da considerare parte fondamentale della tecnica attuale.

Il termine LCA, in realtà, venne coniato solo durante il congresso SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) di Smuggler Notch (Vermont – USA) del 1990, per meglio caratterizzare l'obiettivo delle analisi fino allora svolte sotto il nome di REPA. [2] Negli anni successivi furono organizzate una serie di conferenze sia negli USA che in Europa e nacque la forte esigenza di standardizzare la metodologia in modo che fosse univoca. [1]

A livello europeo, nel 2005 è stata istituita la Piattaforma Europea sulla Valutazione del Ciclo di Vita, coordinata dall'Institute for Environment and Sustainability del JRC (Joint Research Centre) della Commissione Europea e dal Direttorato generale Ambiente della Commissione stessa.

Tra i lavori più importanti di questa iniziativa vi è sicuramente la pubblicazione nel 2010 dell'ILCD Handbook (International Reference Life Cycle Data System), che facilita l'applicazione delle norme ISO in ambito LCA, approfondendo diversi aspetti della metodologia.

La SETAC nel documento “Guideline for Life-Cycle Assessment: a code of practice” ha fornito la definizione più completa di LCA: la Life Cycle Assessment rappresenta un *“processo oggettivo di valutazione dei carichi ambientali connessi con un prodotto, un processo o un'attività, attraverso l'identificazione e la quantificazione dell'energia, dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente, per valutarne l'impatto ambientale e realizzare così le opportunità di miglioramento ambientale. La valutazione include l'intero ciclo di vita del prodotto, processo o attività, che comprende l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il ri-uso, il riciclo e lo smaltimento finale.”* Tale definizione è stata ripresa dall'ISO (International Standard Organization), nella norma ISO 14040, nel quale si afferma che *“l'LCA è un processo di valutazione degli aspetti ambientali associati ad un prodotto o ad un servizio”* e *“considera gli impatti ambientali lungo la durata del ciclo di vita del prodotto (dalla culla alla tomba) dall'acquisizione delle materie prime alla produzione, all'uso fino allo smaltimento”*.



## 1.2 Struttura

La struttura moderna della LCA proposta dalla norma ISO 14040 si compone di quattro fasi principali:

1. Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione (Goal and scope definition).
2. Analisi di inventario (Life Cycle Inventory analysis, LCI).
3. Analisi degli impatti (Life Cycle Impact Assessment, LCIA).
4. Interpretazione e miglioramento (Life Cycle Interpretation).

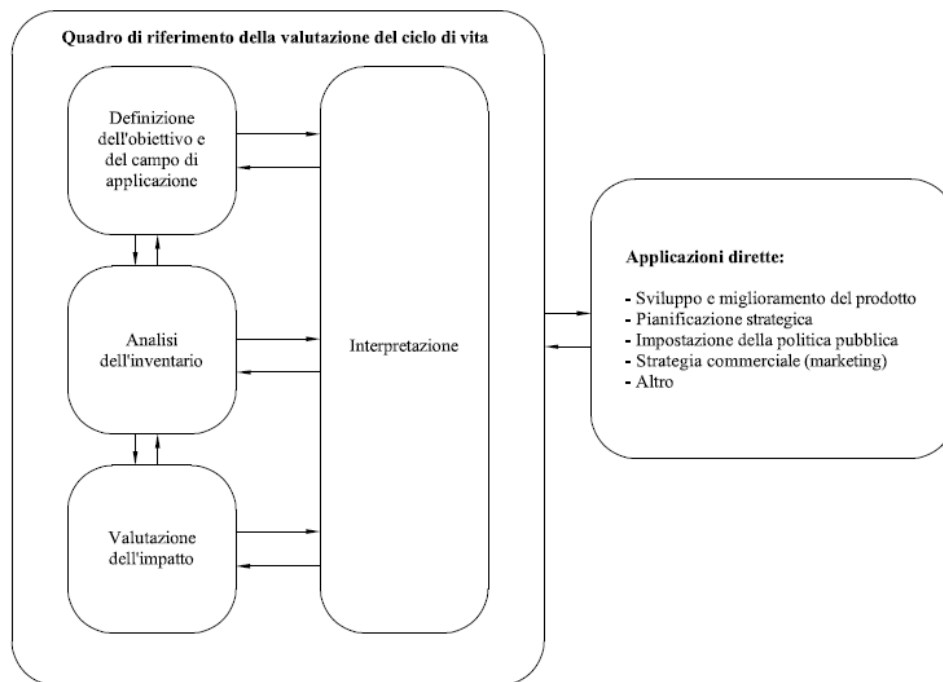


Fig. 1.2.1 Fasi e principali applicazioni dirette di un'analisi LCA [33].

### *1.2.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione*

Una LCA deve essere necessariamente preceduta da una esplicita dichiarazione delle finalità e degli obiettivi dello studio; da questi dipenderanno il risultato finale, il tempo impiegato e le risorse utilizzate.

L'obiettivo di una LCA deve indicare senza ambiguità quali siano l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono ad effettuare lo studio, e il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si intendono comunicare i risultati dello studio.

Inoltre deve essere stabilito il campo di applicazione, definendo il sistema di prodotto da studiare, ovvero un insieme di unità di processo che svolgono uno o più ruoli e individuano il ciclo di vita del prodotto. In particolare secondo la UNI EN ISO 14000 il campo di applicazione deve includere: il sistema di prodotto allo studio; le funzioni del sistema di prodotto, o dei sistemi nel caso di studi comparativi; l'unità funzionale; il confine del sistema; le procedure di allocazione; le categorie di impatto selezionate e la metodologia di valutazione dell'impatto e la susseguente interpretazione da utilizzare; i requisiti dei dati; le ipotesi; le limitazioni; i requisiti iniziali di qualità dei dati; il tipo di riesame critico, se presente; il tipo e il formato del rapporto richiesto per lo studio.

Si evidenzia che *«l'LCA è una tecnica iterativa, per cui, man mano che si raccolgono dati e informazioni, vari aspetti del campo di applicazione possono richiedere di essere modificati allo scopo di soddisfare l'obiettivo originale dello studio»*.

La norma UNI EN ISO 14044:2006 afferma che il campo di applicazione di uno studio LCA deve specificare chiaramente:

- a. il sistema di prodotto allo studio.
- b. le funzioni (ovvero le caratteristiche di prestazione) del sistema di prodotto, o dei sistemi nel caso di studi comparativi;
- c. l'unità funzionale, che secondo la UNI EN ISO 14040:2006 è definita come *“una prestazione quantificata di un sistema di prodotto da utilizzare come riferimento”*.
- d. i confini del sistema di prodotto, che stabiliscono le unità di processo che devono essere incluse nello studio LCA.

### Definizione del sistema

La definizione dei confini del sistema oggetto dello studio è un'operazione che dipende dalle finalità dello studio stesso e che influenza i risultati dell'analisi: lo stesso sistema studiato con confini differenti presenta risultati diversi. In molti casi è necessario che vengano ridefiniti i confini del sistema inizialmente definiti.

Nella definizione del confine del sistema è opportuno prendere in considerazione, ad esempio, le seguenti fasi del ciclo di vita, processi unitari e flussi:

- acquisizione di materie prime;
- elementi in ingresso e in uscita della sequenza principale di processo;
- distribuzione e trasporto;
- produzione e utilizzo di combustibili, di elettricità e di calore;
- uso e manutenzione dei prodotti;
- smaltimento di rifiuti e prodotti di processo;
- recupero dei prodotti dopo l'uso;
- fabbricazione dei materiali ausiliari;
- operazioni aggiuntive quali illuminazione e riscaldamento.

Utilizzando diversi criteri di esclusione, è possibile trascurare gli elementi in ingresso e in uscita che non modificano significativamente le conclusioni globali dello studio.

Si possono individuare tre approcci:

- Dalla culla alla tomba ("from cradle to grave"): lo studio comincia dalle materie prime allo stato naturale e considera tutti i processi e le operazioni coinvolte nel ciclo di vita del prodotto fino al suo smaltimento come rifiuto.
- Dalla culla al cancello ("from cradle to gate"): si considerano solo le prime fasi del ciclo di vita (estrazione e produzione) e si va a definire l'ecoprofilo del prodotto. Questo approccio è utile quando è necessario confrontare sistemi differenti.
- Da cancello a cancello ("from gate to gate"): si considera una sola unità produttiva (o un reparto dell'azienda produttrice) e si valuta il carico ambientale di cui è responsabile. In questo caso si parla di "ecobilancio".

### Unità funzionale

Un'unità funzionale costituisce una misura della prestazione del sistema-prodotto in esame, ovvero l'unità di riferimento a cui verranno ricondotti tutti gli input e gli output del sistema ed i risultati dello studio.

La scelta dell'unità funzionale deve essere coerente con l'obiettivo e il campo di applicazione ed è fondamentale per poter garantire la comparabilità dei risultati dell'analisi, soprattutto nel caso in cui siano studiati sistemi diversi. In questa fase viene definito anche il flusso di riferimento (reference flow) cioè i flussi di energia e materia in input al sistema necessari per ottenere l'unità funzionale.

#### *1.2.2 Analisi di inventario*

L'analisi di inventario (LCI) è solitamente la fase principale (ed anche la più complessa) di un'analisi LCA e consiste nella raccolta e quantificazione dei flussi in entrata e in uscita per un dato sistema di prodotto oltre alla loro organizzazione in un modello analogico lungo l'intero ciclo di vita.

Obiettivo primario di questa fase è pertanto la computazione di tutte le materie prime che sono state impiegate e la stima delle emissioni in aria acqua e suolo generate durante il ciclo di vita, con riferimento all'unità funzionale. [3]

L'analisi di inventario deve fornire una rappresentazione più completa e oggettiva possibile della realtà.

A tale scopo risulta di cruciale importanza la qualità dei dati e delle informazioni implementate nel modello.

I dati di inventario da raccogliere per descrivere il sistema in esame possono derivare da studi in letteratura, libri referenziati, documenti governativi, fonti statistiche, informazioni di mercato, dati tecnologici, dati di processo e si possono suddividere in [3]:

- Dati primari: sono dati specifici del sistema oggetto dello studio, frutto di misure sul campo o di questionari e interviste agli operatori di processo o ad esperti; sono caratterizzati da un elevato livello di rappresentatività del processo in esame.
- Dati secondari: dati medi di settore ricavati da studi di letteratura o banche dati ambientali.
- Dati proxy: dati primari o secondari relativi ad un processo che è simile a quello analizzato, ma non rappresentativo; di solito vengono utilizzati qualora i dati rappresentativi non siano disponibili.

La norma UNI EN ISO 14044 definisce le seguenti componenti per valutare la qualità dei dati:

- riferimento temporale;
- riferimento geografico;
- riferimento tecnologico;
- precisione;
- completezza;
- rappresentatività;
- consistenza;
- riproducibilità;
- fonti dei dati;
- incertezza dell'informazione relativa a dati, modelli e assunzioni.

I risultati finali dell'analisi di inventario sono in genere raggruppati in sei categorie:

1. materie prime;
2. combustibili primari;
3. feedstock;
4. rifiuti solidi;
5. emissioni gassose;
6. emissioni liquide.

Come evidenziato dalla norma UNI EN ISO 14040 *“Il processo per condurre un'analisi d'inventario è iterativo. Man mano che i dati vengono raccolti e il sistema è meglio conosciuto, possono essere identificati nuovi requisiti o limitazioni riguardo ai dati, che richiedono un cambiamento delle procedure di raccolta dei dati, affinché siano ancora soddisfatti gli obiettivi dello studio”*.

### *1.2.3 Analisi degli impatti*

A partire dai risultati dell'LCI, la fase di valutazione dell'impatto del ciclo di vita ha come obiettivo quello di valutare la portata di potenziali impatti sulla salute umana e sull'ambiente. In particolare i dati di inventario vengono associati a specifiche categorie di impatti ambientali e indicatori di categoria. Inoltre La fase di LCIA fornisce informazioni per la successiva fase di interpretazione del ciclo di vita.

La fase di analisi degli impatti è composta da tre fasi obbligatorie e tre opzionali riportate nel diagramma seguente.

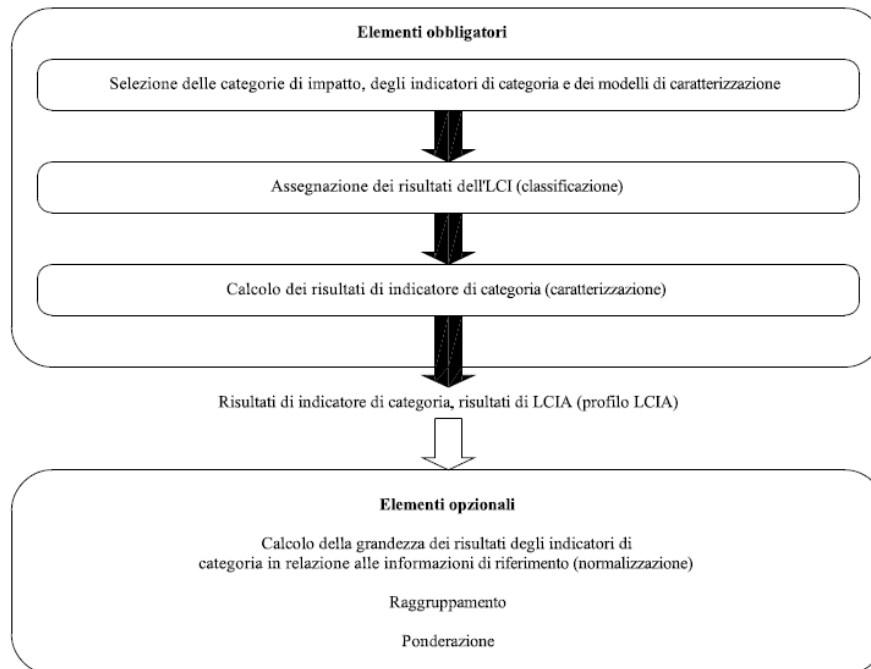


Fig. 1.2.3.1 Elementi obbligatori ed elementi opzionali della fase LCIA [33].

In accordo con la UNI EN ISO 14044, i risultati della fase di analisi degli impatti possono essere sottoposti ad analisi aggiuntive per verificare la qualità dei dati:

- Analisi di gravità: procedura statistica che permette di identificare i dati che hanno il maggiore contributo per il risultato dell'indicatore.
- Analisi di incertezza: procedura che serve a determinare in che modo le incertezze dei dati e delle ipotesi si propagano nei calcoli e come incidono sull'affidabilità dei risultati.
- Analisi di sensibilità: costituisce una procedura atta a determinare in che modo le scelte metodologiche e dei dati incidono sui risultati dell'LCIA.

#### *1.2.4 Interpretazione e miglioramento*

L'obiettivo di questa fase è quello di correlare i risultati dell'analisi di inventario e di quella degli impatti per proporre utili raccomandazioni in relazione agli scopi e agli obiettivi dello studio.

Secondo la UNI EN ISO 14044 durante questa fase possono essere prese in considerazione le seguenti tecniche: controllo di completezza, controllo di sensibilità, controllo di coerenza. Inoltre la fase di interpretazione può generare un procedimento iterativo di riesame e di revisione del campo di applicazione dell'LCA, come pure della natura e della qualità dei dati raccolti per conseguire l'obiettivo definito.





# Capitolo 2

## La valutazione ambientale degli edifici

### 2.1 Introduzione

Nel settore edilizio, dopo l'affermazione ormai diffusa e consolidata del tema dell'efficienza energetica, l'interesse del mercato e degli operatori si sta ora indirizzando verso il tema della sostenibilità ambientale.

La richiesta di indicatori chiari, affidabili e di facile impiego per la valutazione ambientale degli edifici ha portato negli ultimi anni allo sviluppo di diversi strumenti, caratterizzati da approcci molto diversi.

Come avvenuto per la questione energetica, così anche rispetto al tema ambientale si possono individuare due percorsi: da un lato l'iniziativa privata, volta a promuovere la valorizzazione (anche economica) del costruito di qualità e dall'altro la spinta normativa, senza la quale probabilmente il tema ambientale non verrebbe nemmeno affrontato [4].

In particolare il primo approccio, di tipo volontario, ha portato alla definizione dei sistemi multicriterio a punteggio (Green Building Rating Systems) che attribuiscono a ciascun criterio un punteggio, in base alla prestazione ad esso riferita.

Il percorso normativo, invece, si fonda su un approccio Life Cycle Thinking ovvero sulla quantificazione di indicatori ambientali sintetici tramite il metodo del Life Cycle Assessment, riconosciuto a livello internazionale come metodo per valutare il profilo ambientale dei prodotti, codificato all'interno della normativa tecnica internazionale e promosso dalle politiche ambientali europee [5].

Pur costituendo strumenti interessanti, che ampliano la verifica della sostenibilità dalla sola efficienza energetica a uno spettro allargato di tematiche ambientali, i sistemi a punteggio sono strumenti ancora deboli dal punto di vista di una effettiva verifica dell'efficacia ambientale delle scelte progettuali [5].

Hambert et al. hanno evidenziato come l'effettiva riduzione degli impatti ambientali degli edifici certificati tramite questi strumenti sia soltanto del 15% [6].

Inoltre l'applicazione di diversi protocolli ad uno stesso edificio, a causa delle diverse modalità di verifica, rende problematica la comparabilità dei risultati in un'ottica di certificazione ambientale.

I sistemi di valutazione ambientale a punteggio si basano su una “sostenibilità debole” dove la valutazione finale deriva dall’idea che la minore performance ambientale ottenuta in una categoria possa essere compensata dalla migliore performance ambientale ottenuta in un’altra categoria [5].

L’approccio seguito dalla normativa, invece, punta ad una “sostenibilità forte” con l’obiettivo di verificare la riduzione dei diversi impatti ambientali in tutte le fasi del ciclo di vita dell’edificio e dei suoi componenti.

In quest’ottica i sistemi a punteggio stanno progressivamente integrando all’interno dei criteri ambientali anche la metodologia LCA.

L’analisi LCA è uno strumento oggettivo, quantitativo e scientificamente fondato che consente la misurazione sintetica di tutti gli impatti ambientali. In virtù di questo rappresenta il riferimento metodologico di tutte le norme inerenti la valutazione ambientale di edifici e prodotti edili [5].

## **2.2 I sistemi di valutazione multicriterio a punteggio**

I sistemi volontari di valutazione multicriterio a punteggio sono nati all’interno del mercato sulla spinta di diversi gruppi di lavoro costituiti da progettisti, produttori, ricercatori, imprese di costruzioni.

Questi strumenti, a partire dagli obiettivi di riduzione dei consumi di risorse (energia, materiali, acqua), di riduzione dell’inquinamento (emissioni in aria, in acqua e rifiuti solidi) e di tutela della salute umana, individuano un elenco di criteri ambientali (requisiti di progetto). Viene così definito un protocollo con l’elenco dei requisiti ambientali, le procedure di verifica e le soglie di prestazione da soddisfare; in base al grado di soddisfacimento di ciascun requisito, viene associato un punteggio di merito e, in base alla somma dei punteggi ottenuti, si perviene al “punteggio di sostenibilità” dell’edificio [5].

### Il protocollo BREEAM

Il BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*) è un sistema di valutazione di origine anglosassone, sviluppato nel 1990 dal *Building Research Establishment* e rappresenta il primo e il più diffuso strumento di valutazione della qualità ambientale degli edifici.



Esso permette di classificare in base alla loro prestazione ambientale edifici residenziali, scolastici, commerciali, industriali, sanitari, centri dati, uffici ed edifici esistenti, analizzandoli rispetto ad alcuni significativi criteri di riferimento. Sono disponibili diversi protocolli, a seconda del tipo di intervento da eseguire e in base alla destinazione d'uso dell'edificio.

La certificazione si basa sull'attribuzione di crediti relativi alle seguenti categorie:

- gestione del cantiere e dell'involucro edilizio: definizione delle attività di commissioning, di valutazione degli impatti ambientali del cantiere sul sito e della sicurezza;
- energia: consumi energetici ed emissioni nell'ambiente;
- risorse idriche: uso efficiente e risparmio dell'acqua;
- utilizzo del sito e impatto ecologico: scelta del sito e valorizzazione della biodiversità;
- salute e benessere: comfort termico, visivo e IAQ (indoor air quality);
- trasporti: accessibilità al sito e trasporti;
- materiali: certificazione ecologica dei prodotti impiegati attraverso etichette di prodotto;
- rifiuti: riduzione e controllo dei rifiuti prodotti e attività di riciclo;
- inquinamento: riduzione e controllo dell'inquinamento dell'aria e dell'acqua.

Nella categoria "Materiali" viene affrontato il tema dell'analisi LCA, in particolare all'interno del criterio "Mat01 - Life Cycle Impacts". Il soddisfacimento del criterio comporta un punteggio massimo di 5 punti, con una incidenza percentuale del 6% sul risultato totale finale [7].

### Il protocollo LEED

Il LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) è un protocollo di certificazione promosso dall'*US Green Building Council* a partire dal 1995 ed è utilizzato negli USA dal 2000. Il sistema LEED è uno degli standard di certificazione più diffusi al mondo, grazie soprattutto alla sua trasposizione in diversi stati e alla creazione di versioni locali dello strumento.



L'obiettivo del metodo è di valutare le prestazioni ambientali degli edifici in un'ottica complessiva, definendo uno standard di riferimento che consenta di determinare la sostenibilità in edilizia nella fase di progettazione, durante la costruzione e durante la gestione dell'edificio.

Il sistema è organizzato in sette categorie ambientali: sostenibilità del sito, materiali e risorse, gestione delle acque, qualità ambientale interna, energia e atmosfera. La sesta categoria (innovazione nella progettazione) riguarda le pratiche innovative e gli aspetti non trattati nelle prime cinque categorie, mentre la settima (priorità regionale) permette di sottolineare l'importanza di alcune peculiarità locali per la definizione di migliori pratiche per la sostenibilità. Ogni categoria prevede uno o più prerequisiti obbligatori, e altri facoltativi (crediti) che concorrono alla formazione del punteggio. Il sistema di pesatura dei crediti stabilisce che tutti i crediti valgono almeno 1 punto, hanno un valore intero positivo, tutti i crediti ricevono un peso unico e fisso in ogni sistema di valutazione. La certificazione LEED prevede quattro livelli: Certificato/Base - 40-49 punti, Argento - 50-59 punti, Oro - 60-79 punti, Platino - 80-110 punti.

Nella versione LEED v.4 del protocollo è stato introdotto per la prima volta il riferimento all'analisi LCA all'interno della categoria "Materiali e risorse" nel criterio "Building Life Cycle Impact Reduction". Tuttavia l'analisi considera il ciclo di vita dei soli materiali costruttivi ed ha un'incidenza percentuale del 4% sul punteggio complessivo [7].

### Il protocollo ITACA

Il protocollo ITACA è un sistema di valutazione sviluppato dal gruppo di lavoro ITACA (*Istituto per la Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale*) che permette di valutare il livello di qualità energetica e ambientale di un organismo edilizio, misurandone le prestazioni rispetto a determinate aree di valutazione e criteri.



Il Protocollo ITACA è stato pubblicato il 15 gennaio 2004 ed è stato oggetto di una serie di revisioni negli anni successivi; esso è applicabile a edifici residenziali, commerciali, industriali, scolastici e uffici, di nuova costruzione ed esistenti.

Dal protocollo ITACA sono derivati una serie di protocolli di valutazione regionali caratterizzati da una metodologia e da requisiti tecnico-scientifici comuni.

Il protocollo è strutturato secondo una serie di criteri, organizzati in diverse categorie a loro volta appartenenti a cinque aree di valutazione: qualità del sito, consumo di risorse, carichi ambientali, qualità ambientale indoor, qualità del servizio.

Ad ogni criterio corrisponde un indicatore di prestazione ed una scala di riferimento. Mediante specifiche schede di valutazione si ricava il valore dell'indicatore di prestazione per ciascun criterio e si confronta con la scala di riferimento. Con un'opportuna pesatura dei diversi punteggi, si perviene ad un punteggio finale sintetico che rappresenta il livello di sostenibilità ambientale raggiunto.

### Il protocollo DGNB

La certificazione DGNB (Deutsches Gütesiegel Nachhaltiges Bauen) è un sistema di certificazione volontario tedesco.



Tale sistema di rating è stato sviluppato a partire dal 2007 dall'associazione "Deutsches Gütesiegel Nachhaltiges Bauen, Sustainable Building Council", formata da professionisti nel settore dell'edilizia, in cooperazione con il Ministero dei Trasporti Federale Tedesco, Edilizia e Sviluppo urbano.

La certificazione è principalmente diffusa nel paese di origine, ma ultimamente si sta diffondendo anche in altri Paesi per la sua peculiarità di tenere in considerazione il ciclo di vita dei materiali e dei costi.

Il DGNB assegna agli edifici una classificazione (oro, argento o bronzo) basandosi sui punteggi ottenuti nelle seguenti categorie di valutazione: qualità ecologica, qualità economica, qualità socio-culturale e funzionale, qualità tecniche, qualità di processo, qualità dell'ubicazione (è considerata ma non influenza il punteggio).

Nei criteri "Environment 1.1 – Life Cycle Impact Assessment" ed "Environment 2.1 – Life Cycle Impact Assessment – Primary Energy" viene indicata l'analisi LCA come strumento per il calcolo di una serie di indicatori di impatto ambientale. In particolare l'analisi LCA "pesa" all'interno della certificazione per il 13,5% del punteggio totale [7].

### Il protocollo CasaClima Nature

La certificazione di sostenibilità degli edifici CasaClima Nature è stata sviluppata dall'Agenzia per l'Energia Alto Adige – CasaClima e viene descritta, nella versione più recente, in una direttiva tecnica entrata in vigore nel settembre 2017.



La certificazione CasaClima Nature può essere applicata a edifici di nuova costruzione sia residenziali, sia non residenziali.

La valutazione si articola nella verifica dei seguenti punti:

- A. impatto ambientale dei materiali utilizzati per la costruzione dell'edificio;
- B. impatto idrico dell'edificio;
- C. qualità dell'aria interna;
- D. protezione dal gas radon;
- E. illuminazione naturale;
- F. comfort acustico.

Nel primo punto si fa riferimento ad un bilancio di impatto ambientale dei materiali da costruzione in cui sono valutati i seguenti parametri: contenuto di energia primaria non rinnovabile (PEI), potenziale di acidificazione (AP), potenziale di riscaldamento globale (GWP100) e durabilità dei materiali stessi.

I prerequisiti minimi della certificazione sono un'efficienza dell'involucro e complessiva classe CasaClima A.

## **2.3 LCA in edilizia**

La metodologia LCA, essendo nata in ambito industriale, nella sua applicazione per la valutazione ambientale degli edifici deve tener conto delle peculiarità del settore edilizio. Tale peculiarità è stata evidenziata anche in un report del 2003 di SETAC-Europe sullo stato dell'arte della LCA nel settore delle costruzioni [8].

Innanzitutto bisogna considerare che un edificio, a differenza dei prodotti derivati da processi industriali, è unico e diverso dagli altri per forma, materiali, tecniche costruttive, impianti, contesto geografico.

Un altro aspetto da considerare nella valutazione del ciclo di vita di un organismo edilizio è la sua durata e quella dei suoi componenti che possono essere molto diverse e sono frutto di ipotesi.

Secondo quanto previsto dalla norma UNI EN 15643 la valutazione ambientale di un edificio nell'arco del suo ciclo di vita dovrebbe considerare le seguenti fasi:

- Fase di produzione: reperimento materie prime, processi di produzione, trasporti.
- Fase di costruzione: trasporto al cantiere, messa in opera.

- Fase d'uso: consumi energetici, manutenzione, riparazione, sostituzione, riqualificazione.
- Fase di fine vita: demolizione o disassemblaggio dell'edificio, smaltimento, riciclaggio e trasporto dei diversi rifiuti.

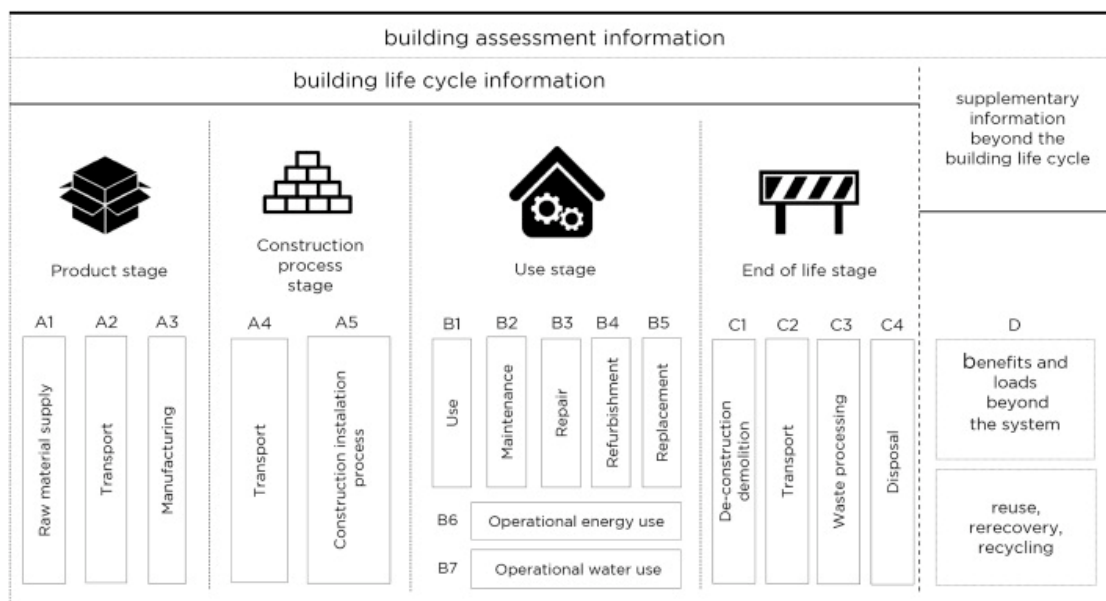


Fig. 2.3.1 Fasi del ciclo di vita di un edificio secondo la norma EN 15978 [34].

Nell'ambito dell'analisi LCA applicata all'edilizia, le unità funzionali più utilizzate sono [39]:

- $m^2$ : la superficie netta di pavimento è l'unità funzionale più impiegata soprattutto negli studi riguardanti edifici residenziali di dimensioni differenti;
- $kWh/(m^2 \text{ anno})$ : unità funzionale utilizzata per confrontare edifici neutralizzando le differenze nella durata di vita e superficie netta di pavimento;
- $m^3$ : unità funzionale utilizzata per edifici caratterizzati da elevata volumetria o per confrontare edifici con piani di diversa altezza;
- intero edificio: unità funzionale meno indicata per confrontare edifici con diverse dimensioni, proprietà, collocazione;
- numero di abitanti;

### 2.3.1 *Quadro normativo*

In ambito ISO il tema della sostenibilità in edilizia è stato affrontato dal Comitato Tecnico ISO/TC59 Sustainability in buildings and civil engineering works e dal sottocomitato SC17 Sustainability in Building construction. L'attività normativa ha portato alla pubblicazione delle seguenti norme tecniche [3]:

- ISO/TS 12720:2014  
Sustainability in buildings and civil engineering works – Guidelines on the application of the general principles in ISO 15392;
- ISO 15392:2008  
Sustainability in building construction – General principles;
- ISO 16745:2015  
Environmental performance of buildings – Carbon metric of a building – Use stage;
- ISO 21929-1:2011  
Sustainability in building construction – Sustainability indicators – Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings;
- ISO/TS 21929-2:2015  
Sustainability in building construction – Sustainability indicators – Part 2: Framework for the development of indicators for civil engineering works;
- ISO 21930:2007  
Sustainability in building construction – Environmental declaration of building products;
- ISO 21931-1:2010  
Sustainability in building construction – Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works – Part 1: Buildings;
- ISO/TR 21932:2013  
Sustainability in Buildings and civil engineering works – A review of terminology.

A livello europeo lo sviluppo di una metodologia standardizzata per la valutazione integrale della prestazione ambientale degli edifici è stato portato avanti dal Comitato Tecnico TC 350 Sustainability of construction works del CEN (Comitato Europeo di Normazione).



Le norme pubblicate, la maggior parte delle quali sono state recepite a livello nazionale dall'UNI (Ente Nazionale di Normazione), sono le seguenti [3]:

- CEN/TR 15941:2010

Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Methodology for selection and use of generic data;

- CEN/TR 16970:2016

Sustainability of constructions works – Guidance for the implementation of EN 15804;

- UNI EN 15643-1:2010

Sostenibilità delle costruzioni – Valutazione della sostenibilità degli edifici – Parte 1: Quadro di riferimento generale;

- UNI EN 15643-2:2011

Sostenibilità delle costruzioni – Valutazione della sostenibilità degli edifici – Parte 2: Quadro di riferimento per la valutazione della prestazione ambientale;

- UNI EN 15643-3:2012

Sostenibilità delle costruzioni – Valutazione della sostenibilità degli edifici – Parte 3: Quadro di riferimento per la valutazione delle prestazioni sociali;

- UNI EN 15643-4:2012

Sostenibilità delle costruzioni – Valutazione della sostenibilità degli edifici – Parte 4: Quadro di riferimento per la valutazione delle prestazioni economiche;

- UNI EN 15804:2014

Sostenibilità delle costruzioni – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole chiave di sviluppo per categoria di prodotto;

- UNI EN 15942:2011

Sostenibilità delle costruzioni – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Modelli di comunicazione azienda verso azienda (B2B);

- UNI EN 15978:2011

Sostenibilità delle costruzioni – Valutazione della prestazione ambientale degli edifici – Metodo di calcolo;

- UNI EN 16309:2014

Sostenibilità delle costruzioni – Valutazione delle prestazioni sociali degli edifici – Metodologia di calcolo;

- UNI EN 16627:2015

Sostenibilità nelle costruzioni – Valutazione della prestazione economica degli edifici – Metodi di calcolo.

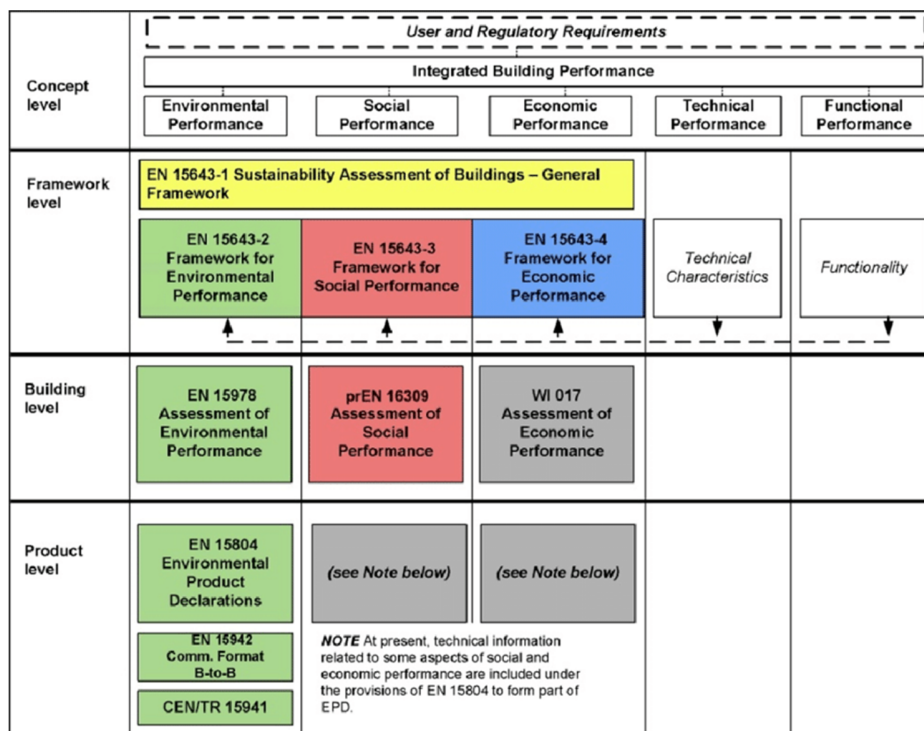


Fig. 2.3.1.1 Quadro di sintesi dei lavori normativi in ambito CEN relativi alla sostenibilità degli edifici [35].

### 2.3.2 Analisi bibliografica

La metodologia LCA applicata agli edifici negli ultimi anni è diventata un'area di studio sempre più diffusa all'interno della letteratura scientifica. Se dal 2009 al 2014 gli articoli pubblicati riguardanti l'analisi LCA in edilizia sono stati 14, nel periodo 2015-2016 sono stati almeno 10 [22], a conferma del crescente interesse in questo ambito.

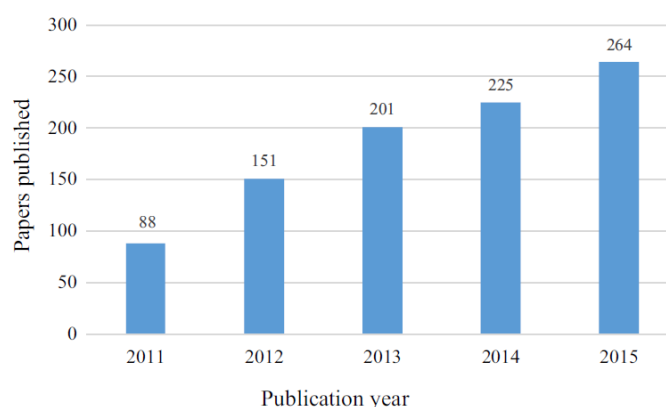


Fig. 2.3.2.1 Articoli scientifici relativi alla metodologia LCA in edilizia, pubblicati dal 2011 al 2015 [22].

Tuttavia, come evidenziato da [3], molti studi sono analisi LCA parziali, che valutano solo i flussi di energia nell'intero ciclo di vita (LCEA), considerando la domanda di energia durante le fasi di produzione e costruzione (energia incorporata), l'uso la manutenzione e la fine vita. Se da un lato questo approccio consente un'interpretazione più semplice dei risultati (si ha un unico indicatore), dall'altro non consente di evidenziare eventuali "burden shifting" ossia spostamenti di impatti da un indicatore a un altro.

Non sempre vengono considerate tutte le fasi del ciclo di vita: generalmente viene esclusa la fase di costruzione; nella maggior parte degli studi nella fase d'uso viene considerata solo l'energia per il riscaldamento; per la fase di fine vita alcuni considerano solo la dismissione dell'edificio e il conferimento ai centri di trattamento, altri anche i trattamenti finali.

Inoltre gli articoli scientifici relativi ad analisi LCA di edifici spesso non presentano un'informazione sufficientemente completa sulle fasi e i processi considerati, rendendo difficoltosa l'interpretazione dei risultati e soprattutto la comparabilità di studi diversi [23].

Sartori e Hestnes [21] hanno esaminato 60 casi studio eseguiti in 9 diversi Paesi, mostrando l'esistenza di una relazione pressoché lineare tra l'energia consumata durante la fase di uso e la domanda di energia associata all'intero ciclo di vita di un edificio. In particolare hanno evidenziato come in un edificio a basso consumo energetico (definito come avente un fabbisogno di energia finale in fase d'uso  $\leq 121 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ) rispetto ad un edificio convenzionale, a parità di altre condizioni, si ha un minore fabbisogno di energia nella fase d'uso e un minore fabbisogno di energia complessivo (nell'arco di vita). Inoltre i due autori hanno sottolineato come in un edificio a basso consumo energetico l'energia incorporata ("embodied energy") sia più elevata rispetto ad un edificio convenzionale, sia in termini percentuali che assoluti.

Nei casi studio analizzati da Sartori e Hestness, per edifici convenzionali l'energia incorporata varia dal 2% al 38% del fabbisogno energetico totale, mentre per edifici a basso consumo energetico varia da un minimo pari al 9% ad un massimo pari al 46%.

Anche Verbeeck e Hens [24] hanno concluso che in edifici a basso consumo energetico l'energia incorporata è più elevata dell'energia in fase d'uso, ma il consumo energetico complessivo è più basso rispetto ad edifici convenzionali.

Citherlet e Defaux [25] hanno confrontato tre varianti della stessa abitazione ed hanno verificato che la grande riduzione del fabbisogno di energia finale (da edificio convenzionale ad edificio a basso consumo) influenza in modo significativo il rapporto degli impatti ambientali legati alla fase d'uso e quelli dovuti alle altre fasi. Nell'abitazione a basso consumo, il consumo di energia non rinnovabile in fase d'uso rappresenta il 20% del totale, mentre nell'abitazione convenzionale tale percentuale sale al 50%; in termini di GWP (Global Warming Potential) il rapporto passa da 25% a 80%.

Cuellar-Franca e Azapagic [26] hanno condotto un'analisi LCA completa delle tre tipologie di edificio residenziale più diffuse nel Regno Unito, ipotizzando una durata di 50 anni. In tutte le tre tipologie di abitazione è stato dimostrato come, in termini di GWP, la fase d'uso contribuisce per il 90%, la fase di costruzione per il 9% ed la fase di fine vita per l'1%.

Proietti et al. [27] hanno effettuato un'analisi LCA di un'abitazione di 320 m<sup>2</sup> costruita secondo lo standard PassivHaus in provincia di Perugia. Le fasi considerate nell'analisi sono state: fase di pre-uso (produzione materiali, trasporto, costruzione), fase d'uso (consumo energetico e manutenzione) e fine vita (abbattimento, trattamento delle macerie, smaltimento o riciclo dei rifiuti). Nell'edificio esaminato la fase d'uso (consumi energetici) è risultata rappresentare il 20-25% degli impatti totali, la fase di manutenzione il 10-18%, i materiali dell'involucro edilizio il 45-52%, gli impianti il 3-9%, i trasporti il 4-5% e i processi di costruzione il 2-5%.

Cellura et al. [28] hanno condotto un'analisi LCE (Life Cycle Energy) di un edificio Net ZEB costruito in provincia di Ancona; in particolare si tratta di uno dei primi edifici ad energia netta quasi zero nel territorio italiano. Dallo studio è emerso che, con riferimento all'indicatore GER (Gross Energy Requirement), la fase d'uso rappresenta solo il 7% degli impatti energetici totali, l'energia incorporata contribuisce per l'88,4% e la fase di fine vita causa il 4,3% degli impatti energetici complessivi.

Paleari et al. [29] hanno analizzato un edificio ZEB costruito in provincia di Milano evidenziando come le fasi di produzione dei materiali e di manutenzione incidano per il 56% in media sugli impatti ambientali, mentre la fase d'uso incide per il 31% sul totale.

Lavagna et al. [30], basandosi su dati statistici, hanno condotto un'analisi del patrimonio edilizio europeo esistente da cui è emerso che l'energia incorporata rappresenta dal 3% al 25% dell'energia totale spesa (incorporata più operativa), con una tendenza all'aumento di tale percentuale per edifici costruiti dopo gli anni '90.

Secondo Chiterlet e Defaux [25] gli impatti ambientali dovuti alle fasi di costruzione, manutenzione e demolizione assumono importanza quando il consumo annuo di energia dell'edificio è inferiore a 150 MJ/m<sup>2</sup>a (41 kWh/m<sup>2</sup>a).

Nel grafico seguente, tratto da [3] e basato su un'analisi di una selezione di studi di letteratura, è sintetizzata l'incidenza dell'energia in fase d'uso e dell'energia incorporata sull'energia totale, per differenti tipologie di edifici, situati in diverse zone climatiche. Si può notare come, a parità di tipologia edilizia, un edificio collocato in un clima freddo presenti valori più bassi di energia incorporata specifica rispetto ad un edificio localizzato in un clima caldo.

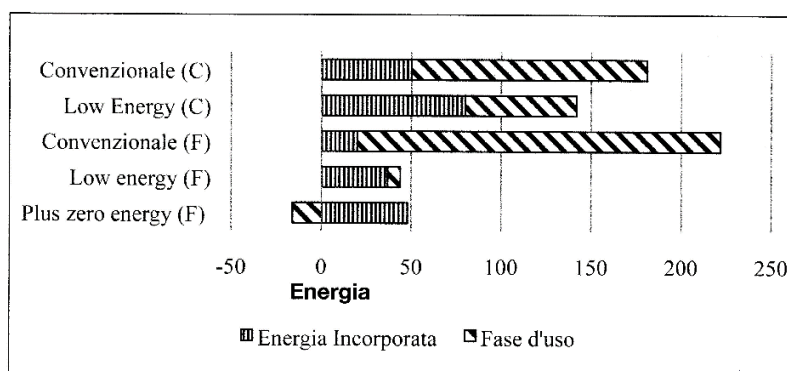


Fig. 2.3.2.2 Energia incorporata e relativa alla fase d'uso per diverse tipologie edilizie. C:clima caldo, F:clima freddo [3].

Per quanto riguarda gli indicatori di impatto ambientale, ogni studio considera grandezze diverse a seconda del metodo di valutazione implementato; i parametri maggiormente utilizzati sono: potenziale di riscaldamento globale (GWP), potenziale di acidificazione (AP), potenziale di riduzione dello strato d'ozono (ODP), potenziale di eutrofizzazione, potenziale di ossidazione fotochimica, ecotossicità delle acque e del suolo.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva relativa ai principali studi presenti in letteratura riguardanti l'applicazione della metodologia LCA all'edificio.

Tab. 2.3.2.1 Alcuni articoli scientifici relativi alla Lyfe Cycle Assessment applicata all'edificio [3], [29], [34], [40]. Sono specificate le fasi considerate, tra parentesi quando accorpate: P: produzione materiali, T: trasporto al cantiere, C: costruzione, U: fase d'uso, M: manutenzione, F: fase di fine vita.

| <b>Autori</b>     | <b>Anno</b> | <b>Stato</b>  | <b>Tipo di edificio</b> | <b>Metodo</b> | <b>Unità funzionale</b> | <b>Vita utile</b> | <b>Fasi considerate</b> |
|-------------------|-------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|
| Cole              | 1996        | California    | Terziario               | LCEA          | -                       | 25/50/100         | PCUM                    |
| Adalberth         | 1997        | Svezia        | Residenziale            | LCEA          | -                       | 50                | PTCUMF                  |
| Suzuki            | 1998        | Giappone      | Terziario               | LCEA          | -                       | 40                | PCUMF                   |
| Adalberth         | 2001        | Svezia        | Residenziale            | LCEA          | Superficie netta        | 40                | PCUMF                   |
| Chen              | 2001        | Hong Kong     | Residenziale            | LCEA          | Superficie netta        | 40                | PTMF                    |
| Peuportier        | 2001        | Francia       | Residenziale            | LCA           | Superficie netta        | 80                | PU                      |
| Thormark          | 2002        | Svezia        | Residenziale            | LCEA          | Superficie netta        | 50                | PTCUMF                  |
| Scheuer et al.    | 2003        | USA           | Terziario               | LCA           | Intero edificio         | 75                | PTCUMF                  |
| Arena et al.      | 2003        | Argentina     | Scolastico              | LCA           | Tecnologia              | 50                | PU                      |
| Mithraratne       | 2004        | Nuova Zelanda | Residenziale            | LCEA          | Intero edificio         | 100               | [PM]TCU                 |
| Junnila           | 2004        | Finlandia     | Terziario               | LCA           | Intero edificio         | 50                | PTCUMF                  |
| Erlandsson et al. | 2005        | Svezia        | Residenziale            | LCA           | Intero edificio         | 35                | PTUM                    |
| Thomark           | 2006        | Svezia        | Residenziale            | LCEA          | -                       | 50                | PTCUMF                  |
| Matasci           | 2006        | Svizzera      | Residenziale            | LCA           | Unità abitativa         | 80                | PTMUF                   |
| Citherlet         | 2007        | Svizzera      | Residenziale            | LCA           | Superficie netta        | -                 | [PTC]UMF                |
| Sartori et al.    | 2007        | diversi       | 60 edifici              | LCEA/LCA      | diverse                 | 30-80             | diverse                 |
| Asif et al.       | 2007        | Regno Unito   | Residenziale            | LCEA          | -                       | -                 | P                       |
| Gerilla et al.    | 2007        | Giappone      | Residenziale            | LCA           | Unità abitativa         | 35                | PTCUMF                  |
| Huberman et al.   | 2008        | Israele       | Residenziale            | LCA           | Unità abitativa         | 50                | PTCUF                   |
| Blengini          | 2009        | Italia        | Residenziale            | LCA           | Superficie netta        | 40                | PTCUMF                  |

|                     |      |               |                        |      |                                    |     |         |
|---------------------|------|---------------|------------------------|------|------------------------------------|-----|---------|
| Kellenberger et al. | 2009 | Svizzera      | Residenziale           | LCA  | Superficie involucro               | 80  | PTCUMF  |
| Kofoworola et al.   | 2009 | Thailandia    | Terziario              | LCEA | Superficie lorda                   | 50  | PTCUMF  |
| Ortiz et al.        | 2009 | Spagna        | Residenziale           | LCA  | Superficie netta                   | 50  | PTMU    |
| Blengini et al.     | 2010 | Italia        | Residenziale           | LCA  | Superficie netta                   | 70  | PTCUMF  |
| Gustavsson et al.   | 2010 | Svezia        | Residenziale           | LCEA | Superficie netta                   | 50  | PTUF    |
| Verbeeck            | 2010 | Belgio        | Residenziale           | LCEA | -                                  | 30  | [PTM]U  |
| Ortiz et al.        | 2010 | Spagna        | Residenziale           | LCA  | Superficie netta                   | 50  | PTCUMF  |
| Leckner             | 2011 | California    | Residenziale           | LCEA | -                                  | 40  | PTCUMF  |
| Yu et al.           | 2011 | Cina          | Residenziale           | LCEA | Unità abitativa                    | -   | PTCF    |
| Tae et al.          | 2011 | Corea del Sud | Residenziale           | LCEA | Superficie netta                   | 60  | PTCUMF  |
| Sodagar et al.      | 2011 | Regno Unito   | Residenziale           | LCEA | Superficie netta                   | 60  | PU      |
| Pons et al.         | 2011 | Spagna        | Scolastico             | LCA  | Stanza                             | 50  | PTCUMF  |
| Blom et al.         | 2011 | Olanda        | Residenziale           | LCA  | Intero edificio                    | 1   | U       |
| Cuellar et al.      | 2012 | Regno Unito   | Residenziale           | LCA  | Superficie netta                   | 50  | PTCUMF  |
| Rossi               | 2012 | Belgio        | Residenziale           | LCA  | Intero edificio                    | 50  | PU      |
| Dahlstrom et al.    | 2012 | Norvegia      | Residenziale           | LCA  | m <sup>2</sup> di superficie utile | 50  | PCU     |
| Monteiro et al.     | 2012 | Portogallo    | Residenziale           | LCA  | Intero edificio                    | 50  | PTCUM   |
| Asdrubali           | 2013 | Italia        | Residenziale/Terziario | LCA  | -                                  | 50  | [PTC]UF |
| Proietti            | 2013 | Italia        | Residenziale           | LCA  | m <sup>2</sup> di superficie utile | 70  | PTCUMF  |
| Stephan             | 2013 | Belgio        | Residenziale           | LCEA | -                                  | 100 | [PCM]TU |
| Peuportier et al.   | 2013 | Francia       | Residenziale           | LCA  | Superficie netta                   | 50  | PTCUMF  |
| Radhi et al.        | 2013 | Bahrain       | Residenziale           | LCEA | Apporto termico                    | 60  | PTCUMF  |
| Basbagill et al.    | 2013 | USA           | Residenziale           | LCA  | Intero edificio                    | -   | PU      |

|                    |      |               |                        |     |                                    |     |        |
|--------------------|------|---------------|------------------------|-----|------------------------------------|-----|--------|
| Iddon et al.       | 2013 | Regno Unito   | Residenziale           | LCA | Intero edificio                    | 60  | PU     |
| Jrade, Jalaei      | 2013 | Canada        | Residenziale           | LCA | Intero edificio                    | -   | PU     |
| Lewandowska et al. | 2013 | Polonia       | Residenziale           | LCA | Intero edificio                    | 100 | PTU    |
| Georges et al.     | 2014 | Norvegia      | Residenziale/Terziario | LCA | m <sup>2</sup> di superficie risc. | 60  | PU     |
| Houlihan et al.    | 2014 | Norvegia      | Residenziale           | LCA | m <sup>2</sup> di superficie risc. | 60  | PU     |
| Gervasio et al.    | 2014 | Portogallo    | Residenziale           | LCA | m <sup>2</sup> di superficie utile | 50  | PU     |
| Jalaei, Jrade      | 2014 | Canada        | Terziario              | LCA | Intero edificio                    | -   | PU     |
| Peng               | 2014 | Cina          | Terziario              | LCA | Intero edificio                    | -   | PTCUMF |
| Ajayi et al.       | 2015 | USA           | Scolastico             | LCA | Intero edificio                    | 30  | PTCUMF |
| Lee et al.         | 2015 | Corea del Sud | Residenziale           | LCA | Intero edificio                    | -   | PTCUMF |
| Shafiq et al.      | 2015 | Malesia       | Terziario              | LCA | Intero edificio                    | -   | PT     |
| Takano et al.      | 2015 | Finlandia     | Edificio ipotetico     | LCA | Superficie netta risc.             | 50  | PTUF   |
| Shin et al.        | 2015 | Corea del Sud | Terziario              | LCA | Intero edificio                    | .   | PU     |
| Rossellò-B. et al. | 2015 | Spagna        | Residenziale           | LCA | Intero edificio                    | 50  | PU     |
| Fouquet et al.     | 2015 | Francia       | Residenziale           | LCA | Intero edificio                    | 100 | PTU    |
| Motuzienė et al.   | 2016 | Lituania      | Residenziale           | LCA | m <sup>2</sup> di superficie risc. | 100 | PU     |



# Capitolo 3

## Il software SimaPro

Il software utilizzato nel caso studio è SimaPro 8.3.0.14. Sviluppato dalla Pré Consultants, è ad oggi uno dei più diffusi ed affermati software per analisi LCA a livello mondiale, utilizzato in oltre 80 Paesi.

Le caratteristiche principali del software sono:

- Interfaccia grafica intuitiva ed organizzata secondo la norma ISO 14040.
- Possibilità di inserire nuovi processi, materiali, metodi di valutazione degli impatti o di modificare quelli già implementati adattandoli al caso studio.
- Possibilità di modellare in modo sistematico e trasparente anche i sistemi più complessi.
- Possibilità di eseguire analisi di incertezza tramite il metodo di Monte Carlo.
- Possibilità di utilizzare una sezione “Wizard” per la creazione guidata del modello.
- Disponibilità di diverse banche dati ambientali.
- Disponibilità di diversi metodi di valutazione degli impatti.
- Possibilità di importare ed esportare dati, grafici e tabelle, grazie alla compatibilità con altri software (es. Excel).
- Costruzione dettagliata del fine vita con possibilità di implementare diversi scenari di smaltimento e riciclo.
- Valutazione degli impatti per ogni fase del modello.
- Analisi delle criticità ambientali, facilmente individuabili nella rappresentazione ad albero del ciclo di vita.
- Possibilità di personalizzare i risultati dell’analisi, scegliendo come raggrupparli e presentarli.
- Possibilità di eseguire analisi di sensibilità, modellare i vari parametri definendo relazioni anche non lineari e valutare scenari alternativi per il sistema analizzato.

Il database SimaPro è articolato nelle seguenti sezioni, facilmente individuabili nella porzione sinistra dell’interfaccia grafica: obiettivo ed ambito, inventario, valutazione dell’impatto, interpretazione.

### 3.1 Obiettivo ed ambito

In questa sezione va inserita una descrizione dell'analisi LCA che definisca autore, committente, obiettivo dello studio ed unità funzionale.

Inoltre è necessario selezionare le librerie che si intendono utilizzare nel corso dello studio. Le librerie (o “banche dati”) sono un particolare tipo di progetto in quanto contengono i dati relativi a processi già presenti all'interno del software; un processo presente in una libreria, dopo essere stato copiato e rinominato, può in qualsiasi momento essere modificato o integrato in maniera flessibile, adattandolo alle necessità del caso studiato.

Ciascuna libreria ha un suo specifico campo di applicazione che viene dettagliatamente descritto nella sezione “Scopo e ambito-descrizione” in modo da permettere all'utilizzatore di escludere librerie non utili al proprio progetto.

Le banche dati già implementate all'interno del software SimaPro 8.3.0.14 sono le seguenti: Agri-footprint (economic allocation, gross energy allocation, mass allocation), Ecoinvent 3 allocation (system, unit), Ecoinvent 3 consequential (system, unit), ELCD, EU & DK Input Output Database, Industry data 2.0, LCA Food DK, Swiss Input Output Database, USA Input Output Database, USA Input Output Database System Expansion, USLCI.

Di seguito sono descritte brevemente le caratteristiche delle principali banche dati.

#### Ecoinvent 3

È una banca dati di origine svizzera che comprende più di 4000 processi nei seguenti settori industriali, relativi per lo più alle attività presenti in Svizzera e nell'Europa occidentale: energia, trasporti, materiali da costruzione, prodotti chimici, prodotti per il lavaggio, carta e cartone, agricoltura, trattamento degli inquinanti.

Ogni processo è dotato di una specifica documentazione e prevede la descrizione dei dati (nome, unità di misura, derivazione del dato, categoria e sottocategoria di appartenenza) oltre a informazioni relative all'incertezza.

Nella versione 3 di Ecoinvent è stata introdotta la distinzione del database secondo due diversi approcci di modellazione: “attributional” e “consequential”.

Inoltre, sempre nella versione 3 del database, ogni processo è presente nella versione “market” e nella versione “transformation”.

#### USA Input Output Database

Questo database trae origine negli Stati Uniti ed i suoi dati sono relativi a elementi industriali e commerciali dei settori economici statunitensi. I dati ambientali sono elaborati con le fonti più aggiornate degli stati americani.

#### LCA Food DK

Database che contiene i dati ambientali relativi a 500 processi riguardanti le catene di produzione di prodotti alimentari in Danimarca. Tale database comprende anche le procedure guidate di LCA che consentono di analizzare i dati forniti.

#### USLCI

Contiene 423 processi che coprono i più importanti dati di inventario del Nord America riguardanti energia, trasporti e produzione di materiali (agricoli, chimici, plastici, metalli e legno).

#### ELCD

Banca dati europea (European reference Life Cycle Database) costruita a partire dal 2006, contiene circa 400 processi in diversi ambiti.

#### Industry data v. 2.0

Dati di inventario di 74 processi ricavati da associazioni del settore industriale. La maggior parte di tali dati è fornita seguendo l'approccio "from cradle to grave".

I processi all'interno delle banche dati possono essere sia di tipo "unit" che di tipo "system"; uno *unit process* visualizza un'operazione unitaria del ciclo produttivo, mentre un *system process* visualizza sia l'operazione unitaria in questione sia tutte le operazioni a monte. Le librerie Ecoinvent ed USA input-output forniscono, per ogni processo, entrambe le versioni; i processi del tipo "unit" sono preferibili ai fini di una maggiore trasparenza, mentre i processi del tipo "system" sono utili quando si intende privilegiare l'immediatezza visiva, specie in sistemi complessi.

## 3.2 Inventario

### 3.2.1 Processi

Questa sezione permette la costruzione di nuovi processi o la modifica di processi esistenti. Per costruire un nuovo processo vanno completati i campi relativi a: nome del processo, prodotti evitati, input noti da natura, input noti da tecnosfera, emissioni in aria, emissioni in acqua, emissioni al suolo, output noti a tecnosfera, rifiuti ed emissione al trattamento.

I processi già implementati nel software sono raggruppati in categorie e in sottocategorie a seconda dello specifico ambito a cui si riferiscono.

Tab. 3.2.1.1 Dati da inserire nei processi [9].

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| NOME DEL PROCESSO                   | Nome con cui viene identificato il processo e la quantità “prodotta”, nel caso di processi di produzione, “smaltita”, nel caso di processi di smaltimento. Questa quantità rappresenta la cosiddetta unità funzionale, cui vengono riferiti tutti i flussi di materia del processo in questione. |
| CO-PRODOTTI                         | Sono i prodotti ottenuti mediante il processo in questione che necessitano di una allocazione per stabilire la quota parte dei sottoprocessi che deve essere attribuita ad essi.   |
| PRODOTTI EVITATI                    | Sono i prodotti di cui si evita la produzione con il processo considerato.   |
| INPUT NOTI DA NATURA                | Sono considerate tutte le materie prime necessarie per il processo e disponibili tal quali in natura e il cui solo danno è il loro esaurimento.  |
| INPUT NOTI DA TECNOSFERA            | Sono considerati tutti i materiali o le forme di energia derivanti da ulteriori processi di tipo industriale o comunque ricollegabili all’attività antropica.  |
| EMISSIONI IN ARIA                   | Emissioni suddivise in funzione del corpo ricettore.   |
| EMISSIONI IN ACQUA                  |  |
| EMISSIONI AL SUOLO                  |  |
| FLUSSI DI RIFIUTI                   |  |
| EMISSIONI NON NATURALI              |  |
| DATI SOCIALI                        |  |
| DATI ECONOMICI                      |  |
| OUTPUT NOTI EMESSI NELLA TECNOSFERA | Sono quei reflui destinati a specifici trattamenti e non alla semplice immissione nell’ambiente.   |

### 3.2.2 Fasi del prodotto

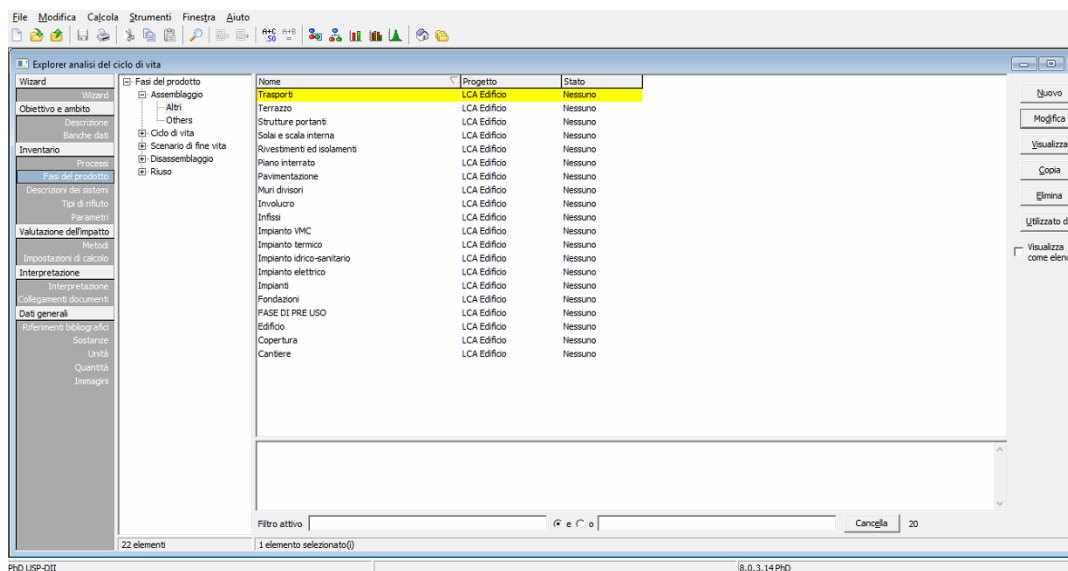


Fig. 3.2.2 Finestra del software SimaPro 8.0.3.14 relativa alla sezione “Fasi del Prodotto”.

Per costruire il ciclo di vita del prodotto sono disponibili le seguenti fasi:

- Assemblaggio (assembly): contiene la lista di tutte le materie prime o materiali semilavorati (con le relative quantità), necessari per produrre un'unità del prodotto e i processi che definiscono i consumi per l'assemblaggio stesso. Per prodotti particolarmente complessi è possibile scomporre un “assembly” in più “subassemblies”, secondo una logica modulare.
- Ciclo di vita: contiene un collegamento all'assembly definito in precedenza ovvero al prodotto oggetto dell'analisi, ai processi relativi all'uso del prodotto (ad esempio consumi energetici), ad uno scenario di fine vita e ad eventuali altri cicli di vita, qualora il sistema analizzato sia particolarmente articolato.
- Scenario di smaltimento: contiene il collegamento ad una serie di processi (ad esempio disassemblaggio, riuso, smaltimento in discarica) che descrivono il fine vita del sistema analizzato e le rispettive percentuali di prodotto che sono ad essi destinate.
- Disassemblaggio: vengono elencate le frazioni in cui viene suddiviso il prodotto (che deve essere necessariamente stato definito in più subassemblies) a fine vita con i relativi scenari di smaltimento e i trattamenti dei rifiuti residui.
- Riuso: contiene un elenco di processi che descrivono il carico ambientale relativo all'operazione di riuso e un riferimento all'assembly (o subassembly) oggetto del riuso.

### 3.3 Valutazione dell'impatto

#### 3.3.1 Metodi

In questa sezione è necessario selezionare il metodo di valutazione dell'impatto tra quelli disponibili nell'apposita libreria. È necessario selezionare anche il set di normalizzazione e pesatura qualora il metodo ne preveda più di uno.

I metodi implementati in SimaPro 8.0.3.14 sono: Eco-indicator 99 (E, H, I), Ecological Scarcity 2006, Boulay et al 2011, Hoekstra et al 2012, Motoshita et al 2010, Pfister et al 2009 e 2010, Ecopoints 97 EDIP/UMIP 97, EDP (2007 e 2008), IPCC 2013 GWP, Cumulative Energy Demand, TRACI, USEtox Recommended, BEES, CML, Eco-indicator 95, Ecological footprint, Ecosystem Damage Potential, Greenhouse Gas Protocol, Selected LCI results.

#### Il metodo Cumulative Energy Demand

Sviluppato da Boustead & Hancock nel 1979, il metodo Cumulative Energy Demand (CED) viene utilizzato per quantificare i consumi energetici (espressi in MJ equivalenti) di un sistema produttivo nell'arco dell'intero ciclo di vita. Tale metodo considera cinque categorie di impatto: energia non rinnovabile, fossile; energia non rinnovabile, nucleare; energia rinnovabile, biomasse; energia rinnovabile, eolica, solare e geotermica; energia rinnovabile, idroelettrica.

#### Il metodo Eco-indicator 99

Il metodo Eco-indicator 99, sviluppato a partire dal 1999 dalla Prè Consultants per conto del Ministero dell'Ambiente olandese, è tra i più diffusi a livello europeo; esso costituisce un potente strumento per chi effettua l'analisi LCA, in quanto consente di aggregare i risultati di una in unità o numeri facilmente comprensibili ed utilizzabili, chiamati appunto Eco-indicatori [9].

Il metodo è stato pensato in tre versioni a seconda del punto di vista che si intende assumere per l'analisi LCA:

- **Egalitaria (Egalitarian):** si considerano tutti i possibili impatti e i loro effetti più catastrofici a lungo termine;
- **Individualista (Individualist):** si considerano gli impatti più scientificamente provati, potenzialmente risolvibili dalla tecnologia nel breve termine;

- Gerarchica (Hierarchist): rappresenta una visione intermedia tra le due precedenti e comprende anche categorie d'impatto selezionate in maniera da bilanciare gli effetti a lungo e breve termine.

Tab. 3.3.1.1 Comportamenti ed opinioni alla base del sistema di valori utilizzato in Eco-indicator 99 [9].

|  | <b>Egualitaria (E)</b>                       | <b>Individualista (I)</b>               | <b>Gerarchica (H)</b>                        |
|--|--|---|--|
| Criterio guida                             | Argomentazioni                               | Esperienza                              | Evidenza                                     |
| Stile nelle scelte                         | Prevenzione                                  | Adattamento                             | Controllo                                    |
| Distribuzione delle risorse                | Paritaria                                    | Prioritaria                             | Proporzionale                                |
| Percezione del tempo                       | Lungo periodo                                | Breve periodo                           | Bilanciamento lungo-breve periodo            |
| Responsabilità verso le generazioni future | Presente < Futuro                            | Presente > Futuro                       | Presente = futuro                            |
| Visione delle risorse                      | Verso esaurimento                            | Abbondanti                              | Scarse                                       |
| Percezione del rapporto fabbisogno-risorse | Gestione del Fabbisogno ma non delle risorse | Gestione delle risorse e del fabbisogno | Gestione delle risorse ma non del fabbisogno |
| Atteggiamento verso la natura              | Attenzione                                   | Laissez-faire                           | Regolamentazione                             |
| Atteggiamento verso l'uomo                 | Costruzione di una società egualitaria       | Channel rather change                   | Restrizione del comportamento                |
| Percezione del rischio                     | Avversione al rischio                        | Ricerca del rischio                     | Accettazione del rischio                     |

Tutte le emissioni e le forme di sfruttamento del territorio sono valutate con riferimento all'Europa, con le seguenti eccezioni:

- il danno della riduzione dello strato di ozono e il riscaldamento globale sono valutati su scala globale;
- il danno dovuto ad alcune sostanze radioattive è valutato su scala globale;
- il danno dovuto all'esaurimento delle risorse è valutato su scala globale;
- il danno dovuto ad alcune sostanze cancerogene persistenti è valutato considerando anche le zone geografiche contigue all'Europa.

Il metodo valuta tre tipi di danno ambientale: salute umana (Human Health), qualità dell'ecosistema (Ecosystem Quality) e sfruttamento delle risorse (Resources). Ogni categoria di danno è a sua volta suddivisa in categorie di impatto.

La categoria di danno salute umana comprende le seguenti categorie di impatto: danni causati da sostanze cancerogene, danni causati da sostanze organiche alle vie respiratorie, danni causati da sostanze inorganiche alle vie respiratorie, danni causati dai cambiamenti climatici, danni causati dalle radiazioni ionizzanti, danni causati dall'assottigliamento dello strato d'ozono.

L'unità di misura associata alle categorie di impatto è il DALY. Tale indicatore esprime il numero di Disability-Adjusted Life Years (DALYs), ovvero il peso di una infermità dovuta ad una invalidità o a una morte prematura attribuibili a ciascuna malattia.

La categoria qualità dell'ecosistema comprende due tipologie di impatto: le emissioni tossiche (Ecotoxicity) e le emissioni che modificano l'acidità ed i livelli nutritivi (Acidification e Eutrophication).

All'interno di questa categoria si può inserire anche l'uso e la trasformazione del territorio (Land use) per i quali l'analisi si basa su dati empirici, in funzione del tipo di territorio e della sua area.

L'unità di misura PDF  $\text{m}^2\text{yr}$  (PDF: Potentially Disappeared Fraction) è associata alle categorie di impatto Acidification/Eutrofication e Land use mentre l'unità di misura PAF  $\text{m}^2\text{yr}$  (PAF: Potentially Affected Fraction) è associata alla categoria di impatto Ecotoxicity.

Nella categoria sfruttamento delle risorse si considerano due aspetti: analisi delle risorse (resource analysis) che lega l'estrazione di una risorsa alla riduzione della sua concentrazione; analisi del danno (damage analysis) che lega la minor concentrazione di risorse all'energia spesa per la loro estrazione in futuro.

L'unità di misura è il MJ surplus, definito come il surplus di energia in MJ che sarà necessario per estrarre 1 kg di materiale nel momento in cui il consumo di tale materiale sarà cinque volte quello estratto dall'umanità prima del 1990.



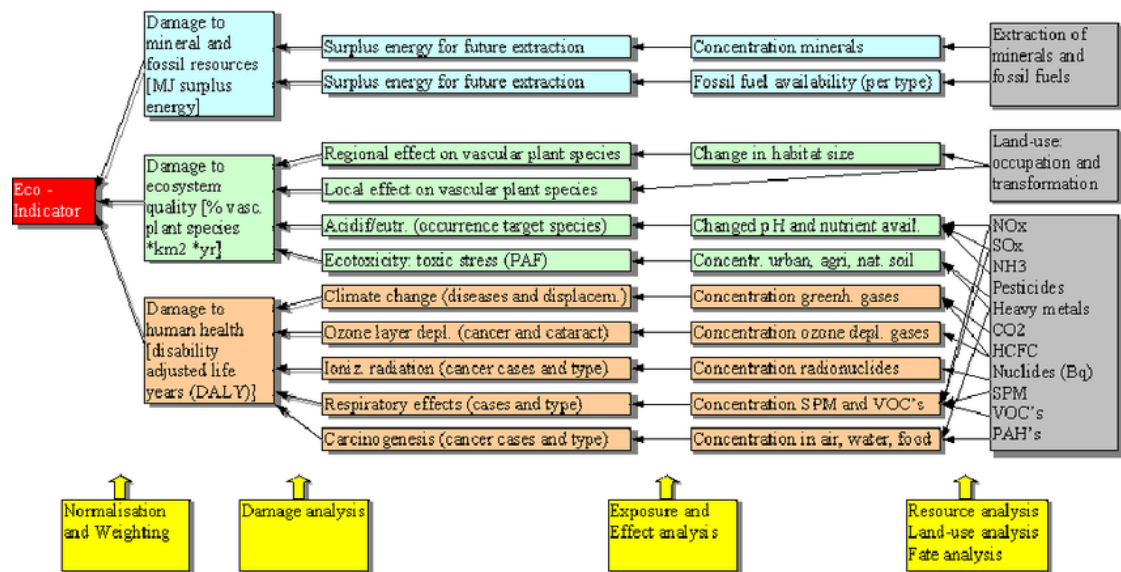


Fig. 3.3.1.1 Struttura del metodo Eco-indicator 99 [36].

### Il metodo EDIP

Il metodo EDIP è stato sviluppato in Danimarca nel 1991 con l'obiettivo di ottenere una metodologia che permettesse di considerare gli aspetti ambientali nello sviluppo dei prodotti industriali. Il metodo comprende le seguenti generali categorie di danno: impatto ambientale; consumo delle risorse; impatto nell'ambiente di lavoro.

Il metodo prevede inoltre 18 categorie di impatti, delle quali le prime 5 hanno effetti globali che sono calcolati sulla base dei dati mondiali, mentre le altre hanno effetti locali che sono calcolati sulla base dei relativi dati in Danimarca. Le categorie sono: Global Warming Potential in gCO<sub>2</sub> equivalenti; Stratospheric Ozone Depletion Potential in g CFC11 equivalenti; Acidification Potential in g SO<sub>2</sub> equivalenti; Eutrophication Potential in g NO<sub>3</sub> equivalenti; Ecotoxicity water chronic in m<sup>3</sup> di acqua inquinata; Ecotoxicity water acute in m<sup>3</sup> di acqua inquinata; Ecotoxicity soil chronic in m<sup>3</sup> di suolo inquinato; Human toxicity air, in m<sup>3</sup> di aria inquinata; Human toxicity water, in m<sup>3</sup> di acqua inquinata; Human toxicity soil, in m<sup>3</sup> di suolo inquinato; Bulk waste in kg; Hazardous waste in kg; Radioactive waste in kg; Slags\ashes in kg; Resources in kg; Ozone formation (human) in pers ppm all'ora; Ozone formation (vegetation) in m<sup>2</sup> ppm all'ora.

Ciò che distingue EDIP dagli altri metodi di valutazione sono [9]:

- diverse categorie di impatto le cui unità di misura non riguardano mai gli effetti ma solo le cause (emissioni equivalenti, m<sup>3</sup> di fluido inquinati e kg di rifiuti prodotti);

- fattore di normalizzazione pari all'inverso del danno subito da una singola persona nel 1990;
- la valutazione avviene moltiplicando il danno normalizzato per il rapporto tra il danno per persona relativo alla categoria e all'anno 1990 e quello che si ammette possa essere subito da una persona in un anno futuro.

### *3.3.2 Impostazioni di calcolo*

Per analizzare il modello costruito SimaPro dispone di diverse funzioni di calcolo: Albero (e Network); Analisi; Confronto; Analisi di incertezza.

#### Albero

L'albero (o network nel caso in cui l'albero contenga cicli) è un diagramma a blocchi che rappresenta il contributo di ogni sottoprocesso al punteggio del processo analizzato.

Tale rappresentazione grafica consente di visualizzare sia il punteggio singolo che i risultati disaggregati riguardanti le varie categorie di impatto o di danno, fino ad arrivare all'inventario in cui si può evidenziare il contributo relativo all'emissione e al consumo di ogni singola sostanza.

#### Analisi

È suddivisa in diverse sezioni (inventario, valutazione dell'impatto, contributo del processo, contributo della sostanza). I risultati sono forniti sotto forma di grafici a barre o di tabelle.

#### Confronto

Il confronto consente di raffrontare gli impatti ambientali di più processi o fasi del prodotto, evidenziandone svantaggi, vantaggi, punti critici.

#### Analisi di incertezza

Mediante l'analisi Monte Carlo, a partire dall'incertezza dei dati, è possibile calcolare una distribuzione statistica dei risultati della valutazione dell'impatto.

### **3.4 Interpretazione**

Questa fase conclusiva può essere gestita dall'utilizzatore in base alle specificità del sistema analizzato e all'obiettivo dello studio. In generale, deve essere prodotto un documento sintetico che, oltre a riportare i principali risultati, evidenzia limiti e potenzialità della metodologia LCA applicata al caso in esame.



# Capitolo 4

## Caso studio

L'obiettivo del lavoro di tesi è quello di analizzare, secondo l'ottica del ciclo di vita, un edificio residenziale a basso consumo energetico al fine di determinare le fasi ed i componenti più rilevanti in termini di impatti energetici ed ambientali.

### 4.1 Descrizione e collocazione dell'edificio

Il modello di edificio oggetto dello studio, in particolare i dati relativi alla fase di costruzione e alla fase di demolizione, è stato ricavato da una ricerca del DITAG del Politecnico di Torino in collaborazione con "Studio Roatta Architetti" [10].

È stato ipotizzato di collocare l'edificio a Padova mantenendo l'orientamento e le caratteristiche architettoniche originali.

Si tratta di un edificio residenziale, destinato ad abitazione privata unifamiliare per 4 persone. L'edificio, che presenta una struttura portante in c.a., è composto da piano interrato, piano terra (adibito a zona giorno) e primo piano (adibito a zona notte). Presenta una superficie calpestabile di 367 m<sup>2</sup> (174,41 m<sup>2</sup> piano interrato, 137,42 m<sup>2</sup> piano terra e 55 m<sup>2</sup> primo piano), una superficie riscaldata di 192 m<sup>2</sup> e volume lordo di 941, 5 m<sup>3</sup>.

Il volume si articola su tre bracci raccolti attorno ad una corte centrale.

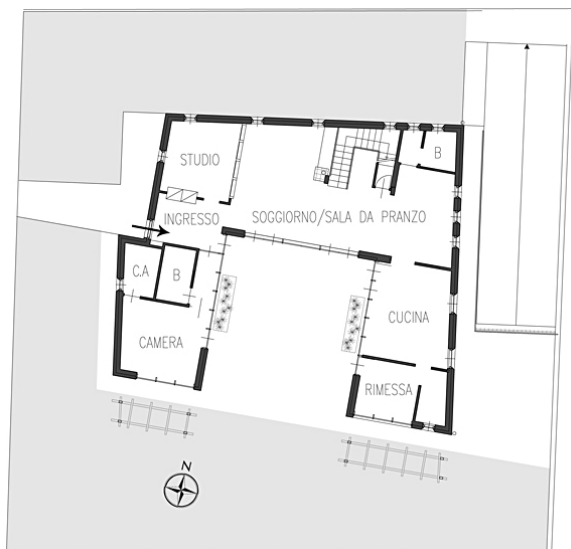


Fig. 4.1.1 Planimetria piano terra [studioroatta.it].



Fig. 4.1.2 Vista Sud [studioroatta.it].

Le principali soluzioni architettoniche ed impiantistiche adottate nell'edificio sono [11]:

- maggior parte delle superfici vetrate rivolte a sud e dotate di opportuni sistemi di ombreggiatura fissi in grado di garantire lo sfruttamento degli apporti solari in inverno ed evitare il surriscaldamento dell'edificio in estate. Le finestre di piccole dimensioni collocate sul lato nord, est ed ovest, sono realizzate con una strombatura a feritoia che ne migliora l'efficienza in termini di illuminazione naturale interna;
- trasmittanza media vetratura  $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; trasmittanza telai compresa tra  $1,22\text{-}1,65 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;
- elevata tenuta all'aria dell'edificio garantita da serramenti con vetrate a doppia camera e attenta disposizione delle barriere al vapore;
- ricambio d'aria garantito da un sistema di ventilazione meccanica controllata, dotato di recuperatore di calore e scambiatore passivo a terreno; in questo modo sono ridotte al minimo le dispersioni termiche per ventilazione, mantenendo la salubrità dei locali;
- isolamento termico realizzato con fibra di legno nella copertura ( $U=0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) e sughero bruno nelle pareti esterne ( $U=0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ );
- isolamento continuo all'intradosso del solaio sull'interrato, eliminazione dei ponti termici strutturali tramite "taglio" termico alla base della muratura, taglio dei solai fra interno ed esterno al piano terreno;
- distribuzione del calore a bassa temperatura tramite sistemi radianti a parete. Produzione del calore tramite pompa di calore aria-acqua ad elevata efficienza anche alle temperature più basse;
- collettori solari termici vetrati piani ( $2 \text{ m}^2$  ciascuno) per la produzione di acqua calda sanitaria (copertura totale del fabbisogno nei mesi estivi).

La località di Padova, secondo la Tab.A allegata al D.P.R. 412/93, aggiornata al 31 ottobre 2009, ricade nella zona climatica E con 2383 gradi giorno e con un periodo convenzionale per la stagione di riscaldamento che va dal 15 ottobre al 15 aprile.

Dalla norma UNI 10349, per la località di Padova sono ricavabili i dati seguenti:

Latitudine:  $45^{\circ}24' \text{ N}$

Longitudine  $11^{\circ}52' \text{ E}$

Altitudine: 12 m

Tab. 4.1.1 Temperature medie mensili per Padova [37].

| u.m. | Gen.  | Feb. | Mar. | Apr. | Mag. | Giu. | Lug. | Ago. | Set. | Ott. | Nov. | Dic. |
|------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| °C   | 1,9   | 4,0  | 8,4  | 13,0 | 17,1 | 21,3 | 23,6 | 23,1 | 19,7 | 13,8 | 8,2  | 3,6  |
|      | Temperatura esterna media annuale $\theta_{m,e}$ : $13,14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

Tab. 4.1.2 Irradiazione solare globale media mensile [MJ/m<sup>2</sup>] su superficie verticale per Padova [37].

| Esposizione | Gen. | Feb. | Mar. | Apr. | Mag. | Giu. | Lug. | Ago. | Set. | Ott. | Nov. | Dic. |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Sud         | 6,9  | 9,5  | 10,5 | 9,6  | 9,5  | 9,3  | 10,0 | 10,9 | 12,2 | 12,0 | 8,2  | 8,1  |
| Est/Ovest   | 3,2  | 5,4  | 8,0  | 10,0 | 12,3 | 13,3 | 14,0 | 12,7 | 10,4 | 7,2  | 4,0  | 3,5  |
| Nord        | 1,6  | 2,5  | 3,7  | 5,2  | 7,5  | 8,9  | 8,6  | 6,3  | 4,2  | 2,9  | 1,8  | 1,5  |

## 4.2 Confini del sistema e unità funzionale

L'analisi LCA può definirsi del tipo “dalla culla alla culla”; sono stati infatti considerati i processi relativi alle seguenti fasi:

- Estrazione delle materie prime;
- Produzione dei materiali costituenti l'edificio;
- Trasporto dei materiali a sito di costruzione;
- Costruzione dell'edificio;
- Fase d'uso dell'edificio;
- Demolizione dell'edificio;
- Riciclaggio/smaltimento dei materiali.

Non sono stati considerati gli impatti causati dal trasporto di persone coinvolte nella costruzione dell'edificio e quelli legati all'attività di progettazione.

Per il caso in esame, si è scelto di utilizzare il m<sup>2</sup> di superficie calpestabile come unità funzionale.

## 4.3 Analisi di inventario

Il modello dell'edificio è stato suddiviso in due sottosistemi corrispondenti all'involucro edilizio e agli impianti. Per l'involucro edilizio è stata ipotizzata una durata di 70 anni mentre per gli impianti è stata ipotizzata una durata di 35 anni (i dati riportati relativi ai quantitativi dei materiali si riferiscono tutti ad un orizzonte temporale di 70 anni).

Il sottosistema involucro edilizio comprende i seguenti componenti: fondazioni, piano interrato, solai e scale, strutture portanti, muri divisorii, copertura, terrazzo, infissi, rivestimenti interni ed esterni, pavimentazione.

Il sottosistema impianti comprende: impianto idrico sanitario, impianto termico, impianto elettrico, impianto di ventilazione meccanica controllata.

#### 4.3.1 Fase di pre uso

##### 4.3.1.1 Involucro

###### Fondazioni

Le fondazioni sono costituite da una sottofondazione di 20 m<sup>3</sup>. È stata ipotizzata una densità media del calcestruzzo di 2400 kg/m<sup>3</sup>. È stata inoltre ipotizzata una quantità di ferro per armatura (rete elettrosaldato a barre di 6 mm di diametro) di 30 kg/m<sup>3</sup>.

Impermeabilizzazione realizzata con guaina in polietilene riciclato stesa al di sopra della fondazione su tutta la superficie.

Tab. 4.3.1.1.1 Materiali fondazioni [10].

| Materiali           | Peso [t] |
|---------------------|----------|
| Massetto cementizio | 48       |
| Calcestruzzo        | 220      |
| PE riciclato        | 0,144    |

###### Piano interrato

Costituito da murature in calcestruzzo, impermeabilizzazione, rampa di accesso all'autorimessa, travi e pilastri.

L'impermeabilizzazione delle superfici verticali è realizzata mediante prodotti cementizi tipo cemento osmotico (composizione 76% sabbia, 20% leganti cementizi, 4% resina poliacrilica) additivato con elastomeri.

Tab. 4.3.1.1.2 Materiali piano interrato [10].

|                     | Materiali            | Peso [t] |
|---------------------|----------------------|----------|
| Elementi portanti   | Calcestruzzo         | 218,3    |
| Sottofondo          | Massetto cementizio  | 16       |
| Muri interni        | Mattoni              | 5,4      |
|                     | Malta                | 1,4      |
| Pavimenti           | Boiaccia di cemento  | 0,53     |
| Isolamento a parete | Cemento              | 0,18     |
|                     | Sabbia               | 0,68     |
|                     | Resine poliacriliche | 0,04     |



#### Solai e scala interna

I solai sono in laterocemento di spessore 25 cm, sia al piano terra sia al primo piano.

Le solette della scala interna (12\*100 cm) sono realizzate in calcestruzzo armato.

Tab. 4.3.1.1.3 Materiali solai e scala interna [10].

|                     | <b>Materiali</b>    | <b>Peso [t]</b> |
|---------------------|---------------------|-----------------|
| Solette scale       | Calcestruzzo        | 4               |
| Solai               | Calcestruzzo        | 25              |
|                     | Laterizi            | 26              |
| Scala               | Massetto cementizio | 4,8             |
| Ringhiere per scale | Acciaio inox        | 0,2             |

#### Strutture portanti

I muri esterni sono realizzati in blocchi laterizi semipieni di 20 cm di spessore. La muratura interna è realizzata in mattoni forati legati con malta.

I pilastri sono realizzati in calcestruzzo.

Tab. 4.3.1.1.4 Materiali strutture portanti [10].

|              | <b>Materiali</b> | <b>Peso [t]</b> |
|--------------|------------------|-----------------|
| Muri esterni | Blocco laterizio | 44,5            |
| Muri interni | Mattoni forati   | 8,7             |
|              | Malta            | 2,2             |
| Pilastri     | Calcestruzzo     | 31,8            |

#### Muri divisorii

I muri divisorii sono formati da lastre di gesso dello spessore di 1,5 cm con telaio in acciaio e rivestite da un materassino in fibra di legno di 12 mm di spessore e da un film di carta di 2 mm.

Tab. 4.3.1.1.5 Materiali muri divisorii [10].

| <b>Materiali</b> | <b>Peso [t]</b> |
|------------------|-----------------|
| Gesso            | 0,45            |
| Carta            | 0,07            |
| Acciaio          | 0,0618          |
| Lana di legno    | 0,048           |

### Terrazzo

Situato al primo piano, realizzato con struttura in acciaio e pavimentazione con tavole di legno di larice.

Tab. 4.3.1.1.6 Materiali terrazzo [10].

| <b>Materiali</b> | <b>Peso [t]</b> |
|------------------|-----------------|
| Acciaio inox     | 0,4             |
| Legno            | 0,17            |

### Copertura

Il tetto è del tipo ventilato. È costituito da una lastra di alluminio a supporto della quale sono inclusi i seguenti elementi: legno lamellare di abete, pannello OSB, listelli in abete, carta kraft. L'isolamento è realizzato con lana di legno dello spessore di 22 cm.

Tab. 4.3.1.1.7 Materiali copertura [10]

| <b>Materiali</b>  | <b>Peso [t]</b> |
|-------------------|-----------------|
| Legno di abete    | 4,5             |
| Pannello OSB      | 1,344           |
| Listelli in abete | 2,025           |
| Carta Kraft       | 0,0924          |
| Lana di legno     | 3,92            |
| Alluminio         | 0,45            |

### Infissi

Gli infissi sono realizzati con tripli vetri (stratificato interno e esterno) aventi due intercapedini contenenti gas argon.

I telai sono realizzati in legno, alluminio e polietilene ad alta densità.

Sono presenti sistemi ombreggianti (veneziane interne alla seconda camera del triplo vetro e tendaggi).

Tab. 4.3.1.1.8 Materiali infissi [10].

|                          | <b>Materiali</b>    | <b>Peso [t]</b> |
|--------------------------|---------------------|-----------------|
| Telai finestre e vetrate | HDPE                | 0,072           |
|                          | Legno multistrato   | 1,2             |
|                          | Alluminio           | 0,2             |
| Veneziane finestre       | Alluminio           | 0,086           |
| Vetratura                | Vetro               | 4,32            |
| Portoncino ingresso      | Legno di quercia    | 0,051           |
|                          | Polistirene espanso | 0,0045          |
| Porte interne            | Legno pressato      | 0,067           |
|                          | Vetro               | 0,23            |
| Porte piano interrato    | Legno pressato      | 0,125           |
|                          | Acciaio             | 0,047           |

#### Rivestimento ed isolamento interno ed esterno

L'isolamento esterno è del tipo a cappotto: pannelli di sughero bruno con spessore di 15 cm fissati tramite collanti e tasselli, successivamente rasati con colla speciale ed armati con rete in fibra di vetro prima dell'applicazione dello spessore di rivestimento più esterno.

Il rivestimento interno è realizzato con polistirolo di spessore 8 cm nel piano interrato e di 10 cm nel piano terra.

Tab. 4.3.1.1.9 Materiali rivestimento ed isolamento [10].

|                      | <b>Materiali</b>            | <b>Peso [t]</b> |
|----------------------|-----------------------------|-----------------|
| Rivestimento interno | Intonaco di calce idraulica | 24,24           |
|                      | Polistirolo                 | 0,4             |
|                      | Piastrelle monocottura      | 0,45            |
|                      | Vernice                     | 0,3             |
|                      | Soletta in polistirolo      | 0,42            |
| Rivestimento esterno | Sughero bruno               | 4,6             |

### Pavimentazione

La pavimentazione prevede un sottofondo in massetto cementizio ed è realizzata in materiali ceramici o in listelli di legno. La scala interna è rivestita in Ardesia mentre portico, davanzali e soglie sono realizzati in pietra di Luserna.

Tab. 4.3.1.1.10 Materiali pavimentazione [10].

| <b>Materiali</b>    | <b>Peso [t]</b> |
|---------------------|-----------------|
| Massetto cementizio | 15,4            |
| Gres porcellanato   | 4,6             |
| Listelli di legno   | 2,55            |
| Ardesia             | 0,76            |
| Pietra di Luserna   | 0,97            |

Di seguito si riporta, per ogni materiale costituente l'involucro, il corrispondente processo implementato nel modello in SimaPro, con il riferimento alla categoria, alla banca dati utilizzata, all'unità di misura e al tipo di rifiuto generato a fine vita dallo smaltimento. Una breve descrizione di ciascun processo e delle relative assunzioni è riportata nell'Appendice.

Tab. 4.3.1.1.11 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità e tipo di rifiuto materiali involucro.

|                        | Categoria SimaPro                               | Processo SimaPro   | Banca dati     | Unità | Rifiuto |
|------------------------|---|--|----------------|-------|---------|
| <b>Fondazioni</b>      |   |  |                |       |         |
| Massetto               | Materiali/Construction/Coverings/Transformation | Cement cast plaster floor {CH}<br> production  Alloc Def, S  | Ecoinvent<br>3 | ton   | Cement  |
| Calcestruzzo           | Materiali/Construction/Binders/Transformation   | Cement, pozzolana and fly ash 36-<br>55%,non-US {CH}   cement<br>production, pozzolana and fly ash 36-<br>55%, non-US   Alloc Def, S | Ecoinvent<br>3 | ton   | Cement  |
| Armatura               | Materiali/Metals /Ferro/Transformation          | Reinforcing steel {RER}   production  <br>Alloc Def, S   | Ecoinvent<br>3 | ton   | Steel   |
| PE riciclato           | Materiali/Plastics/Thermoplast                  | Polyethylene terephthalate (PET)<br>granulate, production mix, at plant,<br>bottle grade RER   | ELCD           | ton   | PET     |
| <b>Piano interrato</b> |   |  |                |       |         |
| Calcestruzzo           | Materiali/Construction/Binders/Transformation   | Cement, pozzolana and fly ash 36-<br>55%,non-US {CH}   cement<br>production, pozzolana and fly ash 36-<br>55%, non-US   Alloc Def, S | Ecoinvent<br>3 | ton   | Cement  |
| Armatura               | Materiali/Metals /Ferro/Transformation          | Reinforcing steel {RER}   production  <br>Alloc Def, S   | Ecoinvent<br>3 | ton   | Steel   |
| Massetto               | Materiali/Construction/Coverings/Transformation | Cement cast plaster floor {CH}<br> production  Alloc Def, S  | Ecoinvent<br>3 | ton   | Cement  |

|                               |   |  |             |     |          |
|-------------------------------|---|--|-------------|-----|----------|
| Mattoni                       | Materiali/Construction/Bricks/Transformation  | Brick {RER}   production   Alloc Def, S  | Ecoinvent 3 | ton | Brick    |
| Malta                         | Materiali/Construction/Binders/Transformation | Cement mortar {CH}   production   Alloc Def, S   | Ecoinvent 3 | ton | Cement   |
| Cemento e boiaccia di cemento | Materiali/Construction/Binders/Transformation | Cement, pozzolana and fly ash 36-55%,non-US {CH}   cement production, pozzolana and fly ash 36-55%, non-US   Alloc Def, S                    | Ecoinvent 3 | ton | Cement   |
| Sabbia                        | Materiali/Minerals                            | Gravel 2/32, wet and dry quarry, production mix, at plant, undried RER S (Copia)   | ELCD        | ton | Ceramics |
| Resine                        | Materiali/Chemicals/Organic/Transformation    | Acrylic binder, without water, in 34% solution state {RER}   acrylic binder production, product in 34% solution state   Alloc Def, S (Copia) | Ecoinvent 3 | ton | Plastics |
| <b>Solai e scala interna</b>  |   |  |             |     |          |
| Calcestruzzo                  | Materiali/Construction/Binders/Transformation | Cement, pozzolana and fly ash 36-55%,non-US {CH}   cement production, pozzolana and fly ash 36-55%, non-US   Alloc Def, S                    | Ecoinvent 3 | ton | Cement   |
| Armatura                      | Materiali/Metals /Ferro/Transformation        | Reinforcing steel {RER}   production   Alloc Def, S  | Ecoinvent 3 | ton | Steel    |
| Mattoni                       | Materiali/Construction/Bricks/Transformation  | Brick {RER}   production   Alloc Def, S  | Ecoinvent 3 | ton | Brick    |

|                           |   |  |                |     |        |
|---------------------------|---|--|----------------|-----|--------|
| Massetto                  | Materiali/Construction/Coverings/Transformation | Cement cast plaster floor {CH}<br> production  Alloc Def, S  | Ecoinvent<br>3 | ton | Cement |
| Acciaio inox              | Materiali/Metals/Ferro/Transformation           | Steel, chromium steel 18/8 {RER}  <br>steel production, converter, chromium<br>steel 18/8   Alloc Def, S                             | Ecoinvent<br>3 | ton | Steel  |
| <b>Strutture portanti</b> |   |  |                |     |        |
| Mattoni                   | Materiali/Construction/Bricks/Transformation    | Brick {RER}   production   Alloc Def,<br>S   | Ecoinvent<br>3 | ton | Brick  |
| Malta                     | Materiali/Construction/Binders/Transformation   | Cement mortar {CH}   production  <br>Alloc Def, S  | Ecoinvent<br>3 | ton | Cement |
| Calcestruzzo              | Materiali/Construction/Binders/Transformation   | Cement, pozzolana and fly ash 36-<br>55%,non-US {CH}   cement<br>production, pozzolana and fly ash 36-<br>55%, non-US   Alloc Def, S | Ecoinvent<br>3 | ton | Cement |
| Armatura                  | Materiali/Metals /Ferro/Transformation          | Reinforcing steel {RER}   production  <br>Alloc Def, S   | Ecoinvent<br>3 | ton | Steel  |
| <b>Muri divisorii</b>     |   |  |                |     |        |
| Gesso                     | Materiali/Minerals                              | Gypsum stone (CaSO4-dihydrate) DE S<br>(Copia)   | ELCD           | ton | Cement |
| Carta Kraft               | Materiali/Paper+board/Packaging paper           | Kraft paper, unbleached {RER}  <br>production   Alloc Def, S   | Ecoinvent<br>3 | ton | Paper  |
| Acciaio                   | Materiali/Metals/Ferro/Transformation           | Steel, low-alloyed {RER}   steel<br>production, converter, low-alloyed  <br>Alloc Def, S   | Ecoinvent<br>3 | ton | Steel  |

|                  |   |  |                |     |           |
|------------------|---|--|----------------|-----|-----------|
| Lana di legno    | Materiali/Wood/Transformation             | Wood wool {RER}   production  <br>Alloc Def, S   | Ecoinvent<br>3 | ton | Wood      |
| <b>Terrazzo</b>  |   |  |                |     |           |
| Acciaio inox     | Materiali/Metals/Ferro/Transformation     | Steel, chromium steel 18/8 {RER}  <br>steel production, converter, chromium<br>steel 18/8   Alloc Def, S | Ecoinvent<br>3 | ton | Steel     |
| Legno            | Materiali/Wood/Products                   | Spruce wood, timber, production mix, at<br>saw mill, 40% water content DE S                              | ELCD           | ton | Wood      |
| <b>Copertura</b> |   |  |                |     |           |
| Legno            | Materiali/Wood/Products                   | Spruce wood, timber, production mix, at<br>saw mill, 40% water content DE S                              | ELCD           | ton | Wood      |
| Pannello OSB     | Materiali/Wood/Products                   | Oriented strand board, OSB III,<br>production mix, at plant, 4,8% water<br>content EU-27 S               | ELCD           | ton | Wood      |
| Carta Kraft      | Materiali/Paper+board/Packaging paper     | Kraft paper, unbleached {RER}  <br>production   Alloc Def, S   | Ecoinvent<br>3 | ton | Paper     |
| Lana di legno    | Materiali/Wood/Transformation             | Wood wool {RER}   production  <br>Alloc Def, S   | Ecoinvent<br>3 | ton | Wood      |
| Alluminio        | Materiali/Metals/Non Ferro/Transformation | Aluminium, wrought alloy {RER}  <br>aluminium production, primary   Alloc<br>Def, S                      | Ecoinvent<br>3 | ton | Aluminium |



| Infissi                                       |  |  |             |     |           |
|---|--|--|-------------|-----|-----------|
| HDPE  | Materiali/Plastics/Thermoplasts                  | Polyethylene, high density, granulate {RER}   production   Alloc Def, S            | Ecoinvent 3 | ton | PE        |
| Legno multistr.                               | Materiali/Wood/Products                          | Particle board, P5 (V100), production mix, at plant, 7,8% water content EU-27 S    | ELCD        | ton | Wood      |
| Alluminio                                     | Materiali/Metals/Non Ferro/Transformation        | Aluminium, wrought alloy {RER}   aluminium production, primary   Alloc Def, S      | Ecoinvent 3 | ton | Aluminium |
| Vetro   | Materiali/Glass/Construction/Transformation      | Flat glass, coated {RER}   production   Alloc Def, S                               | Ecoinvent 3 | ton | Glass     |
| Legno   | Materiali/Wood/Products                          | Spruce wood, timber, production mix, at saw mill, 40% water content DE S           | ELCD        | ton | Wood      |
| Polistirene esp.                              | Materiali/Plastics/Thermoplasts                  | Polystyrene, expandable {RER}   production   Alloc Def, S                          | Ecoinvent 3 | ton | PS        |
| Acciaio                                       | Materiali/Metals/Ferro/Transformation            | Steel, low-alloyed {RER}   steel production, converter, low-alloyed   Alloc Def, S | Ecoinvent 3 | ton | Steel     |
| Rivestimento ed isolamento interno ed esterno |  |  |             |     |           |
| Intonaco                                      | Materiali/Construction/Coverings                 | Base plaster {CH}   production   Alloc Def, S (Copia)                              | Ecoinvent 3 | ton | Cement    |
| Polistirolo                                   | Materiali/Construction/Insulation/Transformation | Polystyrene foam slab {RER}   production   Alloc Def, S                            | Ecoinvent 3 | ton | PS        |
| Piastrelle                                    | Materiali/Construction/Concrete/Coverings        | Ceramic tile {CH}   production   Alloc Def, S                                      | Ecoinvent 3 | ton | Ceramics  |

|                       |   |  |             |     |          |
|-----------------------|---|--|-------------|-----|----------|
| Vernice               | Materiali/Construction/Paints                   | Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RER}   acrylic varnish production, product in 87.5% solution state   Alloc Def, S | Ecoinvent 3 | ton | Paint    |
| Sughero bruno         | Materiali/Construction/Insulation               | Cork slab {RER}   production   Alloc Def, S (Copia)  | Ecoinvent 3 | ton | Wood     |
| <b>Pavimentazione</b> |   |  |             |     |          |
| Massetto              | Materiali/Construction/Coverings/Transformation | Cement cast plaster floor {CH}   production   Alloc Def, S   | Ecoinvent 3 | ton | Cement   |
| Gres                  | Materiali/Construction/Concrete/Coverings       | Ceramic tile {CH}   production   Alloc Def, S  | Ecoinvent 3 | ton | Ceramics |
| Listelli legno        | Materiali/Wood/Products                         | Spruce wood, timber, production mix, at saw mill, 40% water content DE S   | ELCD        | ton | Wood     |
| Ardesia e pietra      | Materiali/Construction/Others/Transformation    | Natural stone plate, cut {CH}   production   Alloc Def, S (Copia)  | Ecoinvent 3 | ton | Ceramics |

#### 4.3.1.2 Impianti

##### Impianto idrico sanitario

Comprende: tubazioni in HDPE e in alluminio, raccordi e collettori per la distribuzione di acqua fredda e calda, condotte fognarie e scarichi idrici, sanitari in ceramica, rubinetteria, condotte pluviali.

Comprende anche collettori solari per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS). Nel modello originario tale impianto era installato al di sopra della tettoia rivolta a sud; nel caso in esame si è ipotizzato di installare i collettori solari in facciata mantenendo l'orientazione sud.

Tab. 4.3.1.2.1 Materiali impianto idrico sanitario [10].

| <b>Materiali</b> | <b>Peso [t]</b> |
|------------------|-----------------|
| Acciaio          | 0,007           |
| Acciaio inox     | 0,134           |
| Ceramica         | 0,351           |
| Vetro            | 0,1156          |
| HDPE             | 0,1445          |
| Alluminio        | 0,0899          |
| Lana di roccia   | 0,0484          |
| Ottone cromato   | 0,0187          |
| Rame             | 0,008           |
| PVC cromato      | 0,0014          |

##### Impianto elettrico

Costituito da cavi in rame, rivestiti da guaine in PVC, e inseriti all'interno di canaline corrugate in HDPE di diametro variabile tra 16 e 30 mm. I valori sono stimati.

Tab. 4.3.1.2.2 Materiali impianto elettrico [10].

| <b>Materiali</b> | <b>Peso [t]</b> |
|------------------|-----------------|
| Rame             | 0,0453          |
| PVC              | 0,0247          |
| HDPE             | 0,05            |

### Impianto termico

Costituito da impianto radiante a parete sotto intonaco (pannelli modulari pre-assemblati in polibutilene), serbatoio di accumulo in acciaio, pompa di calore ipotizzata con struttura portante in acciaio inox.

Tab. 4.3.1.2.3 Materiali impianto termico [10].

| <b>Materiali</b> | <b>Peso [t]</b> |
|------------------|-----------------|
| Acciaio          | 0,29            |
| Acciaio inox*    | 0,15            |
| Polibutilene     | 0,0563          |

\*Aluzink nel modello originale.

### Impianto di ventilazione meccanica controllata

L'impianto è costituito dall'unità (si ipotizza costruita in acciaio inox) che contiene ventilatore, filtri, recuperatore di calore e dalle tubazioni in HDPE di mandata e di ritorno che si sviluppano all'interno dell'edificio. Inoltre l'aria in ingresso viene preriscaldata in inverno e preraffrescata in estate tramite uno scambiatore costituito da tubi interrati (diametro 300 mm).

Tab. 4.3.1.2.4 Materiali impianto di ventilazione meccanica controllata [10].

| <b>Materiali</b> | <b>Peso [t]</b> |
|------------------|-----------------|
| HDPE             | 0,0938          |
| Acciaio inox*    | 0,035           |

\*Aluzink nel modello originale.

Di seguito si riporta, per ogni materiale costituente gli impianti, il corrispondente processo implementato nel modello in SimaPro, con il riferimento alla categoria, alla banca dati utilizzata, all'unità di misura e al tipo di rifiuto generato a fine vita dallo smaltimento. Una breve descrizione di ciascun processo e delle relative assunzioni è riportata nell'Appendice.

Tab. 4.3.1.2.5 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità e tipo di rifiuto materiali impianti.

|                                  | Categoria SimaPro                              | Processo SimaPro   | Banca dati        | Unità | Rifiuto   |
|----------------------------------|--|--|-------------------|-------|-----------|
| <b>Impianto idrico sanitario</b> |  |  |                   |       |           |
| Acciaio                          | Materiali/Metals/Ferro/Transformation          | Steel, low-alloyed {RER}   steel production, converter, low-alloyed   Alloc Def, S                 | Ecoinvent 3       | ton   | Steel     |
| Acciaio inox                     | Materiali/Metals/Ferro/Transformation          | Steel, chromium steel 18/8 {RER}   steel production, converter, chromium steel 18/8   Alloc Def, S | Ecoinvent 3       | ton   | Steel     |
| Ceramica                         | Materiali/Ceramics                             | Sanitary ceramics {CH}   production   Alloc Def, S   | Ecoinvent 3       | ton   | Ceramics  |
| Vetro                            | Materiali/Glass/Construction/Transformation    | Flat glass, coated {RER}   production   Alloc Def, S   | Ecoinvent 3       | ton   | Glass     |
| HDPE                             | Materiali/Plastics/Thermoplasts/Transformation | HDPE pipes E   | Industry data 2.0 | ton   | PE        |
| Alluminio                        | Materiali/Metals/Non Ferro/Transformation      | Aluminium, wrought alloy {RER}   aluminium production, primary   Alloc Def, S                      | Ecoinvent 3       | ton   | Aluminium |
| Lana di roccia                   | Materiali/Construction/Insulation              | Rock wool {CH}   production   Alloc Def, S (Copia)   | Ecoinvent 3       | ton   | Others    |
| Ottone cr.                       | Materiali/Metals/Non Ferro/Transformation      | Brass {CH}   production   Alloc Def, S   | Ecoinvent 3       | ton   | Non-ferro |
| Rame                             | Materiali/Metals/Non Ferro/Transformation      | Copper {RER}   production, primary   Alloc Def, S  | Ecoinvent 3       | ton   | Coppers   |
| PVC cr.                          | Materiali/Plastics/Thermoplasts/Transformation | Polyvinylidenechloride, granulate {RER}   production   Alloc Def, S                                | Ecoinvent 3       | ton   | PVDC      |

| Impianto elettrico                             |  |  |                   |     |         |
|--|--|--|-------------------|-----|---------|
| Rame   | Materiali/Metals/Non Ferro/Transformation      | Copper {RER}   production, primary   Alloc Def, S  | Ecoinvent 3       | ton | Coppers |
| PVC  | Materiali/Plastics/Thermoplasts/Transformation | Polyvinylidenchloride, granulate {RER}   production   Alloc Def, S                                 | Ecoinvent 3       | ton | PVDC    |
| HDPE   | Materiali/Plastics/Thermoplasts/Transformation | HDPE pipes E   | Industry data 2.0 | ton | PE      |
| Impianto termico                               |  |  |                   |     |         |
| Acciaio  | Materiali/Metals/Ferro/Transformation          | Steel, low-alloyed {RER}   steel production, converter, low-alloyed   Alloc Def, S                 | Ecoinvent 3       | ton | Steel   |
| Polibutilene                                   | Materiali/Plastics/Thermoplasts/Transformation | Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {RER}   production   Alloc Def, S                 | Ecoinvent 3       | ton | PET     |
| Acciaio inox                                   | Materiali/Metals/Ferro/Transformation          | Steel, chromium steel 18/8 {RER}   steel production, converter, chromium steel 18/8   Alloc Def, S | Ecoinvent 3       | ton | Steel   |
| Impianto di ventilazione meccanica controllata |  |  |                   |     |         |
| HDPE   | Materiali/Plastics/Thermoplasts/Transformation | HDPE pipes E   | Industry data 2.0 | ton | PE      |
| Acciaio inox                                   | Materiali/Metals/Ferro/Transformation          | Steel, chromium steel 18/8 {RER}   steel production, converter, chromium steel 18/8   Alloc Def, S | Ecoinvent 3       | ton | Steel   |

#### 4.3.1.3 Fase di costruzione

I consumi relativi a questa fase si riferiscono a:

- gasolio per l'alimentazione degli escavatori (1036,8 m<sup>3</sup> di terra movimentata);
- energia elettrica necessaria ad alimentare macchinari, attrezzi e per l'illuminazione del cantiere.

Tab. 4.3.1.3.1 Consumi fase di costruzione [10]

| Impiego                         | Quantità              |
|---------------------------------|-----------------------|
| Alimentazione macchine di scavo | 1036,8 m <sup>3</sup> |
| Energia elettrica               | 2556 MJ               |

Per definire il consumo relativo all'alimentazione degli escavatori nel modello in Simapro è stato utilizzato il processo "Excavation, hydraulic digger {RER} | processing | Alloc Def, S" mentre l'energia elettrica consumata nel cantiere è stata definita con il processo "Electricity, low voltage {IT} | market for | Alloc Def, S". Entrambi questi processi sono descritti brevemente nell'Appendice.

Tab. 4.3.1.3.2 Corrispondenza categorie, processi, banca dati Simapro, unità consumi cantiere.

| Categoria Simapro                      | Processo Simapro   | Banca dati  | Unità          |
|--|--|-------------|----------------|
| <b>Alimentazione macchine di scavo</b> |  |             |                |
| Trasporto/Building equipment           | Excavation, hydraulic digger {RER}   processing   Alloc Def, S | Ecoinvent 3 | m <sup>3</sup> |
| <b>Energia elettrica</b>               |  |             |                |
| Energia/Electricity country mix        | Electricity, low voltage {IT}   market for   Alloc Def, S      | Ecoinvent 3 | MJ             |

Nella fase di costruzione sono compresi anche i trasporti dei materiali dai siti produttivi al cantiere. È stata ipotizzata una distanza media di 50 km dal cantiere. Per ogni materiale è stato calcolato un valore espresso in tkm (tonnellate per km) che tiene in considerazione la massa trasportata moltiplicata per la distanza; ad esempio 1 tkm indica il trasporto del peso di una tonnellata per un km oppure di 1 kg per 1000 km.

Per il trasporto sono state ipotizzate due tipologie di mezzi, entrambe su gomma: "Truck 28t" per il trasporto pesante e "Delivery van <3.5t" per il trasporto leggero.

Tab. 4.3.1.3.3 Corrispondenza categorie, processi, banca dati Simapro, unità trasporti a cantiere.

| Categoria Simapro                     | Processo Simapro   | Banca dati  | Unità |
|---------------------------------------|--------------------|-------------|-------|
| <b>Trasporto materiali a cantiere</b> |                    |             |       |
| Trasporto/Road                        | Truck 28t          | LCA Food DK | tkm   |
| Trasporto/Road                        | Delivery van <3.5t | LCA Food DK | tkm   |

Ad ogni materiale trasportato in cantiere è stato associato un fattore di efficienza di messa in opera compreso tra il 90% e il 97%. Tale fattore serve a tenere conto delle perdite relative a [10]:

- scarti di lavorazione e sfridi dovuti ad eventuali danneggiamenti in fase di trasporto e in cantiere;
- quantità di materiali necessaria alla manutenzione dell'edificio.

La quantità totale di materiale trasportata in cantiere comprende anche i quantitativi aggiuntivi di materiale che servono per le operazioni di manutenzione di parti interne ed esterne dell'edificio. Come evidenziato in [15] tali valori sono puramente indicativi in quanto, dopo un periodo di 35 anni (per gli impianti) o di 70 anni (per l'involucro), le tipologie di materiali adottati potrebbero essere completamente diverse.

Tab. 4.3.1.3.4 Tipo di trasporto, efficienza di messa in opera e relative perdite di processo per i materiali dell'involucro [10].

| <b>Materiali involucro</b> | <b>Tipo di trasporto</b> | <b>Quantità tot. [t]</b> | <b>tkm</b> | <b>Effic. [%]</b> | <b>Scarti [t]</b> |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|------------|-------------------|-------------------|
| Calcestruzzo               | Truck 28t                | 499,1                    | 24955      | 96                | 19,77             |
| Ferri d'armatura           | Truck 28t                | 6,22                     | 311        | 95                | 0,31              |
| Massetti cementizi         | Truck 28t                | 84,2                     | 4210       | 96                | 3,37              |
| Sabbia                     | Truck 28t                | 0,68                     | 34         | 90                | 0,07              |
| Laterizi                   | Truck 28t                | 84,6                     | 4230       | 96                | 3,38              |
| Malta                      | Delivery van <3.5t       | 3,6                      | 180        | 94                | 0,21              |
| Alluminio                  | Truck 28t                | 0,736                    | 36,8       | 95                | 0,04              |
| Legno                      | Truck 28t                | 3,032                    | 151,6      | 96                | 0,47              |
| Carta                      | Delivery van <3.5t       | 0,1624                   | 8,12       | 95                | 0,01              |
| Lana di legno              | Truck 28t                | 3,968                    | 198,4      | 97                | 0,12              |
| Gesso                      | Delivery van <3.5t       | 0,45                     | 22,5       | 95                | 0,02              |
| PE riciclato               | Delivery van <3.5t       | 0,144                    | 7,2        | 95                | 0,01              |
| Vetro                      | Delivery van <3.5t       | 4,55                     | 227,5      | 93                | 0,23              |
| Acciaio inox               | Truck 28t                | 0,6                      | 30         | 95                | 0,03              |
| Intonaco                   | Truck 28t                | 24,24                    | 1212       | 90                | 2,42              |
| Vernice                    | Delivery van <3.5t       | 0,3                      | 15         | 90                | 0,03              |
| Polistirolo                | Delivery van <3.5t       | 0,87                     | 43,5       | 96                | 0,02              |



|                        |                    |        |       |    |      |
|------------------------|--------------------|--------|-------|----|------|
| Sughero bruno          | Truck 28t          | 4,6    | 230   | 95 | 0,23 |
| Gres porcellanato      | Truck 28t          | 4,6    | 230   | 95 | 0,23 |
| Ardesia                | Delivery van <3.5t | 0,76   | 38    | 95 | 0,04 |
| Pietra di Luserna      | Delivery van <3.5t | 0,97   | 48,5  | 95 | 0,03 |
| Piastrelle monocottura | Truck 28t          | 0,45   | 22,5  | 95 | 0,02 |
| Boiaccia di cemento    | Delivery van <3.5t | 0,53   | 26,5  | 97 | 0,02 |
| Cemento                | Truck 28t          | 0,18   | 9     | 96 | 0,01 |
| Resine poliacriliche   | Delivery van <3.5t | 0,04   | 2     | -  | -    |
| HDPE, Polistirene      | Delivery van <3.5t | 0,0765 | 3,382 | -  | -    |
| Acciaio                | Delivery van <3.5t | 0,1088 | 5,44  | -  | -    |

Tab. 4.3.1.3.5 Tipo di trasporto, efficienza di messa in opera e relative perdite di processo per i materiali degli impianti [10].

| Materiali impianti     | Tipo di trasporto  | Quantità tot.<br>[t] | tkm   | Effic.<br>[%] | Scarti<br>[t] |
|------------------------|--------------------|----------------------|-------|---------------|---------------|
| Acciaio inox e acciaio | Delivery van <3.5t | 0,931                | 46,55 | 95            | 0,0216        |
| Alluminio              | Delivery van <3.5t | 0,089                | 4,45  | 95            | 0,0045        |
| Vetro                  | Delivery van <3.5t | 0,1156               | 5,78  | 97            | 0,0035        |
| HDPE, PVC              | Delivery van <3.5t | 1,1586               | 57,93 | 92            | 0,0251        |
| Rame                   | Delivery van <3.5t | 0,0533               | 2,66  | 93            | 0,0037        |
| Polibutilene           | Delivery van <3.5t | 0,0563               | 2,81  | 97            | 0,0017        |
| Ceramica               | Delivery van <3.5t | 0,351                | 17,55 | -             | -             |
| Ottone cromato         | Delivery van <3.5t | 0,0187               | 0,935 | -             | -             |
| Lana di roccia         | Delivery van <3.5t | 0,0484               | 2,42  | -             | -             |

#### 4.3.2 Fase d'uso

Nel modello dell'edificio sono stati considerati i seguenti fabbisogni energetici legati all'occupazione dell'abitazione: fabbisogno di energia per riscaldamento, consumo di energia per ventilazione meccanica controllata, fabbisogno di energia per la produzione di acqua calda sanitaria, usi elettrici obbligati, fabbisogno di energia per uso cucina. Tutti i consumi sono stati riportati nel modello con riferimento alla vita utile ipotizzata per l'edificio (70 anni).

##### 4.3.2.1 Fabbisogno di energia per riscaldamento

Per il calcolo del fabbisogno di energia per riscaldamento è stato utilizzato il programma di simulazione Trnsys (Transient Energy System), che permette di effettuare simulazioni termiche in condizioni dinamiche di sistemi energetici, in particolare di edifici multizona. È stato sviluppato dall'Università del Wisconsin e dall'Università del Colorado, commercializzato nel 1975, viene costantemente aggiornato grazie al lavoro di una serie di istituzioni (Solar Energy Laboratory e Thermal Energy Systems Specialist negli Stati Uniti; Aiguasol Enginyeria in Spagna, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment in Francia, Transsolar GmbH Energietechnik in Germania).

All'interno dell'interfaccia grafica principale, denominata Simulation Studio, mediante l'assemblaggio di una serie di componenti implementati in una libreria interna (Type), è possibile costruire il sistema da analizzare.

Per la modellizzazione degli edifici, all'interno di Trnsys è presente un'interfaccia dedicata denominata TRNBuild.

##### 4.3.2.1.1 Costruzione del modello dell'edificio in TRNBuild

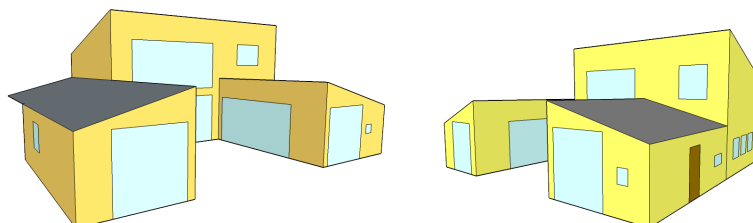


Fig. 4.3.2.1.1 Modello tridimensionale dell'edificio; vista sud-ovest (a sinistra) e vista sud-est (a destra).

Innanzitutto è stato definito l'emisfero in cui si trova l'edificio (emisfero nord).

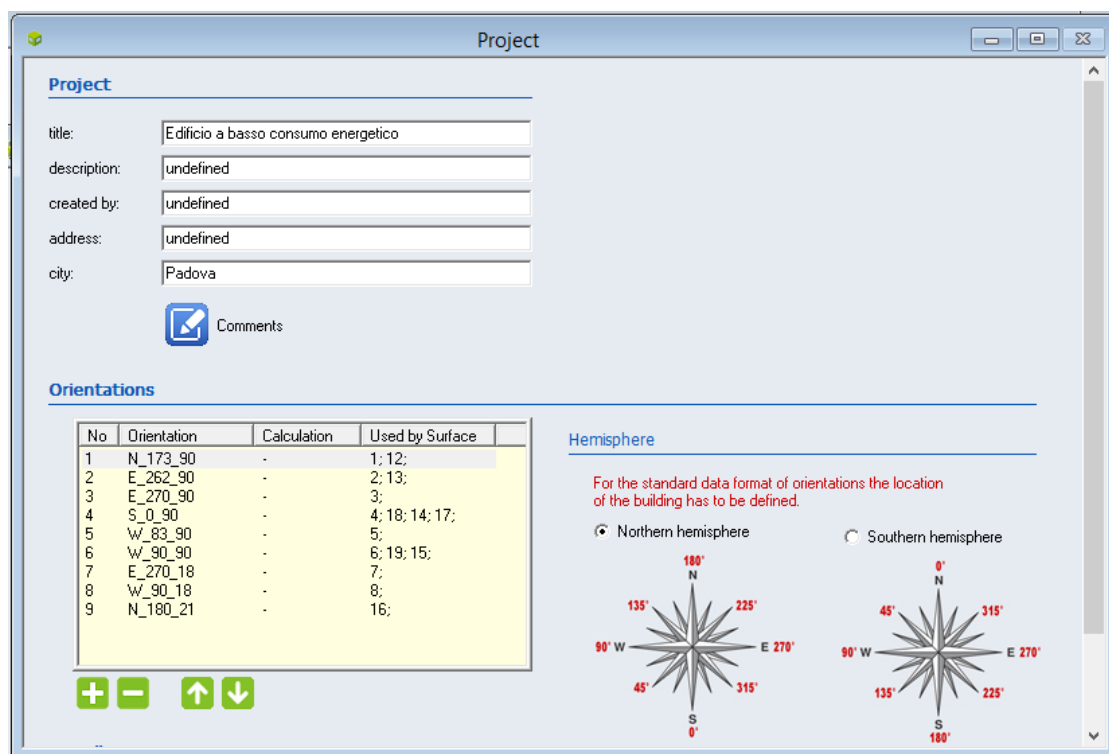


Fig. 4.3.2.1.2 Interfaccia grafica di TRNBuild per la definizione di emisfero ed orientazioni delle superfici.

Sono state quindi definite le orientazioni delle superfici esterne (pareti esterne verticali e copertura): Nord-Ovest (N\_173\_90), Nord-Est (E\_262\_90), Est (E\_270\_90), Sud (S\_0\_90), Sud-Ovest (W\_83\_90), Ovest (W\_90\_90), inclinato di 18° rispetto all'orizzontale in direzione Est (E\_270\_18), inclinato di 18° rispetto all'orizzontale in direzione Ovest (W\_90\_18) e inclinato di 21° rispetto all'orizzontale in direzione Nord (W\_180\_21).

Nella fase successiva sono state definite le zone termiche che caratterizzano l'edificio.

La versione di Trnsys utilizzata permette di definire solo due zone termiche, pertanto la parte riscaldata dell'edificio è stata suddivisa in:

- ZONA\_GIORNO corrispondente al piano terra.
- ZONA\_NOTTE corrispondente al primo piano.

Per ciascuna delle due zone termiche è stato definito un nodo aria, rispettivamente AN\_1 per la ZONA\_GIORNO e AN\_2 per la ZONA\_NOTTE.

È stato ipotizzato che il pavimento del piano terra fosse a contatto con il terreno.

Per quanto riguarda le pareti perimetrali e il tetto, sono state considerate le dimensioni esterne: in questo modo si ha una superficie disperdente maggiore e quindi un margine di sicurezza nel calcolo del fabbisogno energetico per la stagione di riscaldamento

Per il calcolo dei volumi interni, delle superfici di pareti interne e delle pareti che dividono le due zone termiche, sono state considerate le dimensioni interne nette.

Le dimensioni delle pareti interne del primo piano sono state ipotizzate sulla base delle dimensioni delle pareti interne del piano terra (note da planimetria).

Una volta inserito il volume della zona termica ( $m^3$ ) il software calcola in automatico la corrispondente capacità termica dell'aria ( $kJ/K$ ).

Sono stati quindi inserite all'interno del tool le caratteristiche dimensionali e termofisiche delle strutture opache presenti in ciascuno dei due nodi aria. Nell'implementazione dei vari strati, si è proceduto dalla superficie interna verso la superficie esterna.

Per il coefficiente di assorbimento solare è stato assunto un valore di 0,3 (superficie liscia di colorazione chiara) per tutte le pareti e un valore di 0,6 per la copertura (superficie metallica).

Per il coefficiente di emissione nell'infrarosso è stato assunto il valore tipico per elementi edilizi (0,9).

Come coefficienti di scambio termico convettivo delle pareti sono stati utilizzati i valori di default:  $11 \text{ kJ/hm}^2\text{K}$  per le superfici interne e  $64 \text{ kJ/hm}^2\text{K}$  per le superfici esterne.

Per ogni parete, per il solaio interpiano, per il solaio contro terra e per la copertura sono state inserite la tipologia (external, internal, boundary, adjacent), l'area (considerata due volte per la pareti interne) e, per le pareti esterne e la coperture, il fattore di vista. In particolare per la copertura quest'ultimo fattore è stato calcolato dalla relazione  $F=(1+\cos(i))/2$ , dove  $i$  è l'angolo di inclinazione delle falde del tetto rispetto all'orizzontale.

Inoltre sono state implementate le caratteristiche degli elementi vetrati: dal momento che la versione di Trnsys utilizzata consente di implementare al massimo tre finestre, sono state trascurate le superfici vetrate rivolte a Nord (apporto meno significativo della radiazione solare), mentre le superfici vetrate rivolte a Sud, quelle rivolte ad Est e quelle rivolte ad Ovest sono state rispettivamente sommate in un unico elemento finestrato.

La tipologia di finestra è stata individuata tra quelle disponibili all'interno della libreria di TRNBuild, trovando un valore ottimale per i fattori di ombreggiamento esterno ed interno.

Come per le pareti, sono stati utilizzati i valori di default per i coefficienti di scambio termico convettivo. Anche per il valore  $C=1/R$  del telaio è stato mantenuto il valore di default.

È stato definito un tasso di infiltrazione d'aria di 0,1 vol/h per entrambe le zone termiche.

Il sistema di riscaldamento è stato implementato sia nella zona giorno che nella zona notte. In particolare è stato inserito un sistema ideale di potenza infinita (ipotizzata tutta di tipo convettivo), in grado di mantenere una temperatura costante di  $20^\circ\text{C}$  in tutta la zona termica per l'intera stagione di riscaldamento.

Per quanto riguarda gli apporti termici interni, è stato utilizzato il valore di default per edifici residenziali pari a  $4 \text{ W/m}^2$ , costante tutto l'anno. Dalla superficie netta di ciascuna zona termica, è stato quindi calcolato (in  $\text{kJ/h}$ ) l'apporto termico totale suddiviso in 30% di potenza termica radiante e 70% di potenza termica convettiva.

Si riportano nelle tabelle seguenti le stratigrafie relative agli elementi di involucro implementati nel modello. Per ogni elemento edilizio in particolare vengono riportati: lo spessore  $d$  (ipotizzato in base a valori tipici per la tipologia edilizia dove non noto), la conduttività termica utile  $\lambda$ , la resistenza termica  $R$ , la densità  $\rho$  e il calore specifico  $c_p$  di ogni strato oltre allo spessore totale e alla corrispondente trasmittanza termica  $U_k$ .

I valori per la resistenza termica superficiale interna ed esterna sono stati ricavati, in funzione direzione del flusso termico, dal prospetto 1 della norma UNI EN ISO 6946.

La conduttività termica utile dei vari materiali e la loro densità sono state ricavate dalla norma UNI 10351:1994, confrontando i valori ottenuti con quelli riportati nella norma UNI 10355.

I valori del calore specifico sono stati ricavati dalla norma EN ISO 1456:2007.

Per il blocco laterizio semipieno e solaio latero cementizio, sono riportati valori delle conduttanze termiche equivalenti, ottenuti dalla relazione  $\lambda_{\text{equiv}} = d/R$ .

Nel caso fossero disponibili più valori per lo stesso componente, è stato scelto il valore più cautelativo.

Tab. 4.3.2.1.1.1 Stratigrafia parete perimetrale.

| Parete perimetrale                       |                 |                          |                             |                                |                       |                               |
|--|-----------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
|  | $d \text{ [m]}$ | $\lambda \text{ [W/mK]}$ | $R \text{ [m}^2\text{K/W]}$ | $\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$ | $c_p \text{ [J/kgK]}$ | $U_k \text{ [W/m}^2\text{K]}$ |
| Resistenza superficiale interna $R_{si}$ |                 |                          | 0,13                        |                                |                       |                               |
| Intonaco interno                         | 0,015           | 0,7                      | 0,021                       | 1400                           | 1000                  |                               |
| Polistirolo                              | 0,1             | 0,16                     | 0,625                       | 1050                           | 1300                  |                               |
| Blocco laterizio semipieno               | 0,2             | 0,39                     | 0,51                        | 1000                           | 1000                  |                               |
| Sughero bruno                            | 0,15            | 0,045                    | 3,33                        | 130                            | 1500                  |                               |
| Intonaco esterno                         | 0,015           | 0,9                      | 0,017                       | 1800                           | 1000                  |                               |
| Resistenza superficiale esterna $R_{se}$ |                 |                          | 0,04                        |                                |                       | 0,21                          |
| Spessore totale e $U_k$                  | 0,48            |                          | 4,68                        |                                |                       |                               |

Tab. 4.3.2.1.1.2 Stratigrafia parete interna.

| Parete interna                           |       |                      |                            |                                |                  |                                |
|--|-------|----------------------|----------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|
|  | d [m] | $\lambda$<br>[W/m·K] | R<br>[m <sup>2</sup> ·K/W] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $c_p$<br>[J/kgK] | $U_k$<br>[W/m <sup>2</sup> ·K] |
| Resistenza superficiale interna $R_{si}$ |       |                      | 0,13                       |                                |                  |                                |
| Lastra di gesso                          | 0,015 | 0,21                 | 0,07                       | 700                            | 1000             |                                |
| Lana di legno                            | 0,012 | 0,08                 | 0,15                       | 160                            | 1470             |                                |
| Carta Kraft                              | 0,002 | 0,17                 | 0,011                      | 1000                           | 1338             |                                |
| Intercapedine non ventilata              | 0,05  | 0,31                 | 0,16                       | 1,23                           | 1008             |                                |
| Carta Kraft                              | 0,002 | 0,17                 | 0,011                      | 1000                           | 1338             |                                |
| Lana di legno                            | 0,012 | 0,043                | 0,28                       | 160                            | 1470             |                                |
| Lastra di gesso                          | 0,015 | 0,21                 | 0,07                       | 700                            | 1000             |                                |
| Resistenza superficiale interna $R_{si}$ |       |                      | 0,13                       |                                |                  |                                |
| Spessore totale e $U_k$                  | 0,108 |                      | 1,01                       |                                |                  | 0,98                           |

Tab. 4.3.2.1.1.3 Stratigrafia solaio contro terra.

| Solaio contro terra             |       |                     |                           |                                |                  |                                |
|---------------------------------|-------|---------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|
|                                 | d [m] | $\lambda$<br>[W/mK] | R<br>[m <sup>2</sup> K/W] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $c_p$<br>[J/kgK] | $U_k$<br>[W/m <sup>2</sup> ·K] |
| Resistenza superficiale interna |       |                     | 0,17                      |                                |                  |                                |
| Piastrelle in ceramica          | 0,01  | 1                   | 0,01                      | 2300                           | 840              |                                |
| Massetto sabbia e cemento       | 0,04  | 0,93                | 0,043                     | 1800                           | 1000             |                                |
| Polistirolo                     | 0,1   | 0,16                | 0,625                     | 1050                           | 1300             |                                |
| Solaio latero-cementizio        | 0,25  | 0,74                | 0,338                     | 1800                           | 1000             |                                |
| Guaina isolante                 | 0,005 | 0,17                | 0,0294                    | 920                            | 2200             |                                |
| Intonaco interno                | 0,015 | 0,7                 | 0,021                     | 1400                           | 1000             |                                |
| Resistenza superficiale interna |       |                     | 0,17                      |                                |                  |                                |
| Spessore totale e $U_k$         | 0,42  |                     | 1,4                       |                                |                  |                                |

Tab. 4.3.2.1.1.4 Stratigrafia solaio interpiano.

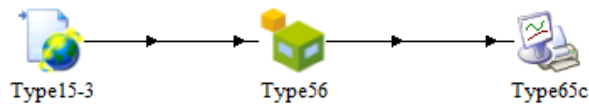
| <b>Solaio interpiano</b>        |       |                     |                           |                                |                  |                                |
|---------------------------------|-------|---------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|
|                                 | d [m] | $\lambda$<br>[W/mK] | R<br>[m <sup>2</sup> K/W] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $c_p$<br>[J/kgK] | $U_k$<br>[W/m <sup>2</sup> ·K] |
| Resistenza superficiale interna |       |                     | 0,17                      |                                |                  |                                |
| Piastrelle in ceramica          | 0,01  | 1                   | 0,01                      | 2300                           | 840              |                                |
| Massetto sabbia e cemento       | 0,04  | 0,93                | 0,043                     | 1800                           | 1000             |                                |
| Polistirolo                     | 0,1   | 0,16                | 0,625                     | 1050                           | 1300             |                                |
| Solaio latero-cementizio        | 0,25  | 0,74                | 0,338                     | 1800                           | 1000             |                                |
| Intonaco interno                | 0,015 | 0,7                 | 0,021                     | 1400                           | 1000             |                                |
| Resistenza superficiale interna |       |                     | 0,17                      |                                |                  |                                |
| Spessore totale e $U_k$         | 0,42  |                     | 1,4                       |                                |                  | 0.71                           |

Tab. 4.3.2.1.1.5 Stratigrafia tetto.

| <b>Tetto</b>                             |       |                      |                            |                                |                  |                                |
|--|-------|----------------------|----------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|
|  | d [m] | $\lambda$<br>[W/m·K] | R<br>[m <sup>2</sup> ·K/W] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $c_p$<br>[J/kgK] | $U_k$<br>[W/m <sup>2</sup> ·K] |
| Resistenza superficiale interna $R_{si}$ |       |                      | 0,1                        |                                |                  |                                |
| Tavole di legno di abete                 | 0,025 | 0,12                 | 0,208                      | 450                            | 1600             |                                |
| Freno al vapore (carta)                  | 0,005 | 0,17                 | 0,029                      | 1000                           | 1338             |                                |
| Lana di legno                            | 0,22  | 0,043                | 5,116                      | 160                            | 1000             |                                |
| ARIA                                     | 0,04  | 0,31                 | 0,129                      | 1,23                           | 1008             |                                |
| Pannello OSB                             | 0,009 | 0,444                | 0,02                       | 650                            | 1700             |                                |
| Guaina impermeabilizzante                | 0,005 | 0,17                 | 0,029                      | 920                            | 2200             |                                |
| Lamiera                                  | 0,005 | 52                   | 0,001                      | 7800                           | 450              |                                |
| Resistenza superficiale esterna $R_{se}$ |       |                      | 0,04                       |                                |                  | 0,176                          |
| Spessore totale e $U_k$                  | 0,309 |                      | 5,67                       |                                |                  |                                |

#### 4.3.2.1.2 Simulazione dinamica in Simulation Studio

Lo schema a blocchi rappresentativo della simulazione è il seguente:



Le type utilizzate sono:

- Type15-3: blocco che raccoglie i dati sul clima, in particolare sono stati utilizzati i dati climatici per Venezia (località con dati disponibili più vicina a Padova) forniti nel sito [energyplus.net](http://energyplus.net) (Test Reference Year Venice IWEC). Tra i vari formati disponibili, è stato utilizzato il file con estensione epw.
- Type56: blocco che rappresenta l'edificio, è stato collegato al file con estensione b18 generato in precedenza in TRNBuild.
- Type65c: è il blocco che consente la lettura dei risultanti generando un file di testo esterno con i valori medi orari delle variabili di simulazione ovvero la temperatura di ciascun nodo aria definito nel modello dell'edificio e il calore sensibile che deve essere fornito a ciascuna zona termica per mantenere la temperatura di set point.

Sono stati collegati quindi gli output di Type15-3 con gli input di Type56, secondo il seguente schema:

Dry bulb temperature → 1- TAMB

Percent relative humidity → 2- RELHUMAMB

Effective sky temperature → 3- TSKY

Solar zenith angle → 5- AZEN

Solar azimuth angle → 6- AAZM

Total tilted surface radiation for surface-1 → 7- IT\_N\_173\_90

Total tilted surface radiation for surface-2 → 8- IT\_E\_262\_90

Total tilted surface radiation for surface-3 → 9- IT\_E\_270\_90

Total tilted surface radiation for surface-4 → 10- IT\_S\_0\_90

Total tilted surface radiation for surface-5 → 11- IT\_W\_83\_90

Total tilted surface radiation for surface-6 → 12- IT\_W\_90\_90



Total tilted surface radiation for surface-7 → 12- IT\_E\_270\_18  
 Total tilted surface radiation for surface-8 → 12- IT\_W\_90\_18  
 Total tilted surface radiation for surface-9 → 12- IT\_N\_180\_21  
 Beam radiation for surface-1 → 13- IB\_N\_173\_90  
 Beam radiation for surface-2 → 14- IB\_E\_262\_90  
 Beam radiation for surface-3 → 15- IB\_E\_270\_90  
 Beam radiation for surface-4 → 16- IB\_S\_0\_90  
 Beam radiation for surface-5 → 17- IB\_W\_83\_90  
 Beam radiation for surface-6 → 18- IB\_W\_90\_90  
 Beam radiation for surface-7 → 16- IB\_E\_270\_18  
 Beam radiation for surface-8 → 17- IB\_W\_90\_18  
 Beam radiation for surface-9 → 18- IB\_N\_180\_21  
 Angle of incidence for surface-1 → 19- AI\_N\_173\_90  
 Angle of incidence for surface-2 → 20- AI\_E\_262\_90  
 Angle of incidence for surface-3 → 21- AI\_E\_270\_90  
 Angle of incidence for surface-4 → 22- AI\_S\_0\_90  
 Angle of incidence for surface-5 → 23- AI\_W\_83\_90  
 Angle of incidence for surface-6 → 24- AI\_W\_90\_90  
 Angle of incidence for surface-7 → 22- AI\_E\_270\_18  
 Angle of incidence for surface-8 → 23- AI\_W\_90\_18  
 Angle of incidence for surface-9 → 24- AI\_N\_180\_21  
 Ground reflectance → 25- GRDREF

Sono stati infine collegati gli output di Type56 con gli input di Type65.

La simulazione è stata eseguita con un timestep di un'ora per un periodo di tempo di un anno.

Risulta un fabbisogno di energia per riscaldamento lato involucro pari a 9538 MJ/anno.

Noto il rendimento globale medio stagionale stimato per l'impianto termico (comprensivo dei rendimenti di regolazione, di distribuzione e di emissione) pari a 2,62 [10], risulta un consumo di energia elettrica di 3640 MJ/anno che corrispondono a 1011 kWh/anno.

#### 4.3.2.2 Consumo impianto di ventilazione meccanica controllata

Per la stima dei consumi elettrici dell'impianto di ventilazione meccanica controllata è stato ipotizzato un funzionamento continuativo (24 h al giorno) durante tutto l'anno, con un assorbimento pari a 32 W.

Risulta un consumo annuo di energia elettrica per la ventilazione pari a 280 kWh/anno.

#### 4.3.2.3 Fabbisogno di energia per la produzione di acqua calda sanitaria

Il calcolo del fabbisogno di energia per la produzione di ACS è stato eseguito secondo la norma UNI 11300 parte 2 che fornisce la seguente relazione:

$$Q_w = \rho_w \times c_w \times \sum_i [V_{w,i} \times (\theta_{er,i} - \theta_0)] \times G \text{ [kWh]}$$

dove:

$\rho_w$  è la massa volumica dell'acqua, ipotizzabile pari a 1000 kg/m<sup>3</sup>;

$c_w$  è il calore specifico dell'acqua, pari a 1,162\*10<sup>-3</sup> kWh/kg·K;

$V_{w,i}$  è il volume di acqua giornaliero per l'i-esima attività o servizio richiesto [m<sup>3</sup>/giorno];

$\theta_{er,i}$  è la temperatura di erogazione dell'acqua per l'i-esima attività o servizio richiesto [°C];

$\theta_0$  è la temperatura dell'acqua fredda in ingresso [°C];

$G$  è il numero di giorni del periodo di calcolo considerato (mese nel caso in esame).

Essendo la valutazione energetica del caso in esame una valutazione di tipo standard (A2), sono stati utilizzati i seguenti valori di riferimento:

Tab. 4.3.2.3.1 Dati per il calcolo fabbisogno ACS secondo UNI 11300-2.

|   |  |
|---|--|
| <b>Temperatura di erogazione <math>\theta_{er}</math></b> | 40 °C  |
| <b>Temperatura acqua fredda <math>\theta_0</math></b>     | 12 °C  |
| <b>Parametri a e b</b>                                    | Da prospetto 30: per 50 m <sup>2</sup> < S <sub>u</sub> ≤ 200 m <sup>2</sup><br>a=1,067 l/m <sup>2</sup> *giorno<br>b=36,67 l/giorno |
| <b>Volume di acqua richiesto <math>V_w</math></b>         | Per edifici residenziali: $V_w = a \times S_u + b$ [l/giorno]<br>$V_w = 1,067 \cdot 192 + 36,7 = 241$ l/giorno                       |

La valutazione della produzione energetica dei collettori solari è stata eseguita secondo la norma UNI EN 15316-4-3 che implementa un metodo di calcolo basato sulla procedura di calcolo della Carta-f.

Essendo il numero di collettori (e di conseguenza l'area di apertura) fissato, si è scelto di individuare l'angolo di inclinazione migliore per massimizzare la copertura del fabbisogno energetico annuale per l'acqua calda sanitaria e al contempo evitare un sovradimensionamento dell'impianto nei mesi estivi (ovvero evitare un valore della frazione solare mensile  $f > 1$ ) che indurrebbe a problemi di stagnazione.

In particolare è stato scelto un angolo di  $90^\circ$  (posizione verticale dei collettori).

L'energia prodotta dal sistema solare termico è stata calcolata, mese per mese, secondo la seguente relazione:

$$Q_{sol,out,m} = f_{sol,m} \cdot Q_{sol,us,m} = (1,029Y - 0,065X - 0,245Y^2 + 0,0018X^2 + 0,0215Y^3) \cdot Q_{sol,us,m} \text{ [kWh]}$$

dove:

$Q_{sol,us,m}$  è il fabbisogno termico globale mensile per la fornitura di acqua calda sanitaria;  
comprende anche le dispersioni della rete di distribuzione acs, conteggiate con un fattore di aumento del 5%;

$$X = \frac{(A \cdot U_{loop} \cdot \eta_{loop} \cdot \Delta T \cdot f_{st} \cdot t_m)}{Q_{sol,us,m} \cdot 1000}$$

dove:

$A$  è l'area di apertura della totalità dei collettori [ $m^2$ ];

$U_{loop}$  è il coefficiente di dispersione termica del circuito collettori (compresi i tubi) [ $W/m^2K$ ]

$$U_{loop} = a_1 + a_2 \cdot 40 + (U_{loop,p} / A);$$

$U_{loop,p}$  è il coefficiente di dispersione globale di tutte le tubazioni del circuito collettori [ $W/mK$ ];

$\eta_{loop}$  è il fattore di efficienza del circuito collettori, inclusa l'influenza dello scambiatore;

$\Delta T$  è la differenza di temperatura di riferimento, definita come  $\Delta T = \theta_{ref} - \theta_{e,avg}$  [ $^\circ C$ ]

con:  $\theta_{ref}$  temperatura di riferimento; per sistemi ACS:  $\theta_{ref} = 11,6 + 1,18\theta_w + 3,86\theta_{e,w} - 1,32\theta_{e,avg}$

$\theta_w$  : temperatura desiderata per l'acqua calda sanitaria ( $40^\circ C$ );

$\theta_{e,w}$  : temperatura acqua fredda da rete ( $12^\circ C$ );

$\theta_{e,avg}$  temperatura media aria esterna del mese preso in considerazione [ $^\circ C$ ];

$f_{st}$  è il fattore correttivo del volume del serbatoio di accumulo  $V_{sol}$  [l], definito come:  $f_{st} = (V_{ref} / V_{sol})^{0,25}$

con  $V_{ref} = 75 \cdot A$  [l] valore standard del volume di accumulo;

$t_m$  durata del periodo (mese) in considerazione [h].

$$Y = \frac{(A \cdot IAM \cdot \eta_{loop} \cdot \eta_0 \cdot I_m \cdot t_m)}{Q_{sol,us,m} \cdot 1000}$$

dove:

$\eta_0$  è il fattore di efficienza del collettore a perdite nulle, riferito all'area di apertura;

$IAM$  è il modificatore dell'angolo di incidenza del collettore, a  $50^\circ$ ;

$I_m$  irradianza solare media sul piano del collettore del periodo (mese) considerato [ $W/m^2$ ].

I dati relativi alla radiazione solare mensile sul piano del collettore sono stati ricavati dal database Pv-gis.

Per il valore di accumulo è stato ipotizzato un valore pari a  $V_{sol}=70 \cdot A=560$  l.

In assenza di dati specifici, sono stati usati i seguenti valori di default per tipici sistemi solari a collettore piano vetrato, forniti dalla norma UNI EN 15316-4-3 nell'appendice B.2:

Tab. 4.3.2.3.2 Dati di default per calcolo produzione del sistema solare [38].

| $\eta_0$ | $a_1$ [ $W/m^2K$ ] | $a_2$ [ $W/m^2K$ ] | $IAM_{50^\circ}$ | $\eta_{loop}$ | $U_{loop,p}$ [ $W/mK$ ] |
|----------|--------------------|--------------------|------------------|---------------|-------------------------|
| 0,8      | 3,5                | 0                  | 0,94             | 0,9           | $U_{loop,p}=5+0,5A=9$   |

Tab. 4.3.2.3.3 Calcolo produzione ACS collettori solari.

|                               | GEN   | FEB   | MAR   | APR   | MAG    | GIU   | LUG   | AGO    | SETT   | OTT    | NOV    | DIC   | ANNO  |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Fabbisogno ACS [l]            | 7471  | 6748  | 7471  | 7230  | 7471   | 7230  | 7471  | 7471   | 7230   | 7471   | 7230   | 7471  | 87965 |
| $\theta_{e,avg}$ [°C]         | 1,9   | 4     | 8,4   | 13    | 17,1   | 21,3  | 23,6  | 23,1   | 19,7   | 13,8   | 8,2    | 3,6   |       |
| $\Delta \theta_{ref}$ [°C]    | 100,7 | 95,84 | 85,63 | 74,96 | 65,45  | 55,7  | 50,36 | 51,52  | 59,4   | 73,1   | 86,09  | 96,76 |       |
| $F_{st}$                      | 1,02  |       |       |       |        |       |       |        |        |        |        |       |       |
| $U_{loop,p}$ [W/m²K]          | 9     |       |       |       |        |       |       |        |        |        |        |       |       |
| $U_{loop}$ [W/m²K]            | 4,62  |       |       |       |        |       |       |        |        |        |        |       |       |
| $\eta_{loop}$                 | 0,9   |       |       |       |        |       |       |        |        |        |        |       |       |
| $t_m$ [h]                     | 744   | 672   | 744   | 720   | 744    | 720   | 744   | 744    | 720    | 744    | 720    | 744   |       |
| $I_m$ [W/m²]                  | 90,4  | 143,3 | 161,7 | 142,1 | 128,3  | 118,3 | 130,4 | 147,9  | 161,7  | 135,8  | 100,8  | 94,6  |       |
| $Q_{sol,us,m}$ [kWh]          | 255,4 | 230,7 | 255,4 | 247,2 | 255,4  | 247,2 | 255,4 | 255,4  | 247,2  | 255,4  | 247,2  | 255,4 | 3007  |
| Parametro X                   | 9,94  | 9,46  | 8,45  | 7,40  | 6,46   | 5,50  | 4,97  | 5,09   | 5,86   | 7,21   | 8,50   | 9,55  |       |
| Parametro Y                   | 1,43  | 2,26  | 2,55  | 2,24  | 2,02   | 1,87  | 2,06  | 2,33   | 2,55   | 2,14   | 1,59   | 1,49  |       |
| $Q_{sol,out,m}$ [kWh]         | 143,8 | 200,4 | 246,8 | 231,1 | 233,08 | 223,4 | 252,5 | 269,75 | 263,98 | 233,99 | 168,31 | 154,4 |       |
| Fattore di copertura solare f | 0,56  | 0,87  | 0,97  | 0,94  | 0,91   | 0,90  | 0,99  | 1      | 1      | 0,92   | 0,68   | 0,60  | 0,86  |

Il fabbisogno di energia per la produzione di acqua calda sanitaria è di 3007 kWh/anno.

L'energia utile fornita dall'impianto solare per coprire il fabbisogno di ACS risulta pari a 2590 kWh/anno.

L'energia che deve essere fornita dall'impianto termico è di 417 kWh/anno.

Assumendo un valore del rendimento di produzione medio stagionale della pompa di calore  $\eta_{ps}=3,02$ , il prelievo di energia elettrica per la produzione di ACS risulta pari a 138 kWh/anno.

#### 4.3.2.4 Usi elettrici obbligati

Gli usi elettrici obbligati inseriti nel modello dell'edificio sono stati ricavati dal report del progetto "MICENE" [12], relativo alle misure dei consumi di energia elettrica in 110 abitazioni italiane.

Dal momento che i dati della campagna di rilevazione si riferiscono al periodo 2000-2002, si è scelto di tener conto della maggiore efficienza energetica che caratterizza le attuali apparecchiature domestiche (in particolare grazie alle normative più restrittive) e delle diverse modalità d'uso, con degli opportuni fattori di scala ricavati in letteratura [13].

Per il consumo relativo a lavastoviglie e lavabiancheria è stato considerato un valore pari al 50% del valore riportato nel report per tener conto del contributo derivante dai pannelli solari alle temperature di lavaggio più basse [10].

Tab. 4.3.2.4.1 Calcolo usi elettrici obbligati.

| <b>Applicazione domestica</b> | <b>Consumo medio annuo da progetto Micene [kWh/anno]</b> | <b>Fattore di scala</b> | <b>Consumo medio annuo [kWh/anno]</b> | <b>Consumo percentuale [%]</b> |
|-------------------------------|--|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| Frigocongelatore              | 637  | 0,65                    | 414,05                                | 34,8%                          |
| Lavabiancheria (50%)          | 112  | 0,918                   | 102,82                                | 8,6%                           |
| Lavastoviglie (50%)           | 184,5  | 0,873                   | 161,07                                | 13,5%                          |
| Illuminazione                 | 375  | 0,502                   | 188,2                                 | 15,79%                         |
| Apparecchi audiovisivi        | 355  | 0,782                   | 277,61                                | 23,29%                         |
| PC                            | 132  | 0,364                   | 48,05                                 | 4,03%                          |
| TOTALE                        | 1795,5   |                         | 1191,8                                | 100 %                          |

#### 4.3.2.5 Consumi uso cucina

I consumi energetici dovuti alla cottura dei cibi sono stati ricavati da uno studio presente in letteratura [14] in cui sono stati misurati i consumi per la preparazione di un pasto tipo in una famiglia italiana composta da 4 persone. In particolare è stato ipotizzato uno scenario di 10 pasti a settimana utilizzando un piano cottura a induzione (il sistema più diffuso in abitazioni a basso consumo energetico).

Si è ricavato un valore pari a 232,9 kWh/anno di energia elettrica prelevata al contatore.

Nella tabella e nel diagramma seguenti sono riassunti, suddivisi per tipologia, i consumi elettrici relativi alla fase d'uso implementati nel modello dell'edificio.

Tab. 4.3.2.5.1 Consumi elettrici fase d'uso.

|                         | kWh/anno | MJ/anno |
|-------------------------|----------|---------|
| Riscaldamento           | 1011     | 3639,6  |
| Ventilazione meccanica  | 280      | 1008    |
| Produzione ACS          | 138      | 496,8   |
| Usi elettrici obbligati | 1191,8   | 4290,48 |
| Uso cucina              | 232,9    | 838,44  |
| TOTALE                  | 2853,7   | 10273   |

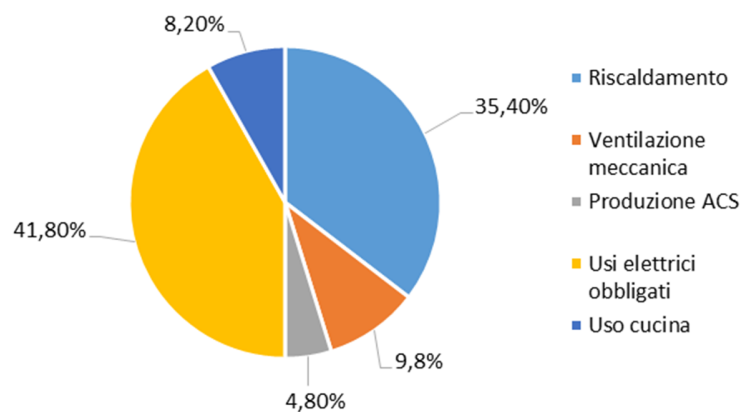


Fig. 4.3.2.5.1 Consumi elettrici in fase d'uso.

L'unica fonte di energia per i consumi dell'abitazione è l'energia elettrica. Per modellare tale consumo è stato utilizzato il processo "Electricity, low voltage {IT} | market for | Alloc Def, S" della banca dati Ecoinvent 3. Una descrizione di tale processo è riportata in Appendice.

### 4.3.3 Fine vita

Secondo quanto riportato in [10] per il fine vita dell'edificio è stata ipotizzata una demolizione completa dello stesso, articolata in tre fasi: demolizione selettiva, demolizione controllata e trattamento macerie.

#### Demolizione selettiva

Prima dell'abbattimento dell'edificio vengono rimosse alcune parti riciclabili dell'edificio (acciai, legno travi copertura, legno in listelli, lana di legno copertura, alluminio, vetro da infissi e pannelli solari, rame).

I consumi energetici in questa fase sono legati all'uso di attrezzi per il disassemblaggio e al trasporto dei materiali disassemblati.

Tab. 4.3.3.1 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità demolizione selettiva.

| Categoria SimaPro                       | Processo SimaPro  | Banca dati  | Unità |
|---|---|-------------|-------|
| <b>Uso attrezzi per disassemblaggio</b> |   |             |       |
| Energy/Electricity country mix          | Electricity, low voltage {IT}   market for   Alloc Def, S | Ecoinvent 3 | MJ    |
| <b>Trasporto materiali</b>              |   |             |       |
| Trasporto/Road                          | Truck 28t   | LCA Food DK | tkm   |

#### Demolizione controllata

Questa fase consiste nell'abbattimento vero e proprio dell'edificio mediante martello idraulico demolitore montato su escavatore.

I consumi energetici in questa fase sono quelli dovuti all'uso del martello demolitore, e quelli dovuti alla movimentazione e carico dei materiali mediante pala meccanica.

Essendo il martello idraulico montato su un escavatore, la maggior parte dei consumi è attribuibile agli spostamenti del mezzo, anziché all'azione del martello demolitore [10].

Tab. 4.3.3.2 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità demolizione controllata.

| Categoria SimaPro                                  | Processo SimaPro  | Banca dati  | Unità          |
|--|---|-------------|----------------|
| <b>Movimentazione materiali con pala meccanica</b> |   |             |                |
| Trasporto/Building equipment                       | Excavation, skid-steer loader {RER}   processing   Alloc Def, S | Ecoinvent 3 | m <sup>3</sup> |
| <b>Uso martello demolitore</b>                     |   |             |                |
| Trasporto/Building equipment                       | Excavation, hydraulic digger {RER}   processing   Alloc Def, S  | Ecoinvent 3 | m <sup>3</sup> |



### Trattamento macerie

In seguito all'abbattimento le macerie sono caricate tramite pala meccanica su di un autoarticolato e trasportate ai siti di trattamento o in discarica.

Il primo sito di trattamento è dotato di un frantoio a mascelle con un separatore magnetico in modo da poter raccogliere i rottami ferrosi ed inviarli ai processi di riciclo. Il resto delle macerie viene frantumato fino ad ottenere un aggregato riciclato utilizzabile per sottofondi stradali o riempimenti in sostituzione di aggregati da costruzione vergini [10].

In consumi energetici sono dovuti alla movimentazione e carico delle macerie mediante pala meccanica, all'energia elettrica per alimentare il frantumatore e al trasporto dei materiali residui.

Tab. 4.3.3.3 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità trattamento macerie.

| Categoria SimaPro                                  | Processo SimaPro  | Banca dati  | Unità          |
|--|---|-------------|----------------|
| <b>Movimentazione materiali con pala meccanica</b> |   |             |                |
| Trasporto/Building equipment                       | Excavation, skid-steer loader {RER}   processing   Alloc Def, S | Ecoinvent 3 | m <sup>3</sup> |
| <b>Alimentazione elettrica frantoio</b>            |   |             |                |
| Energy/Electricity country mix                     | Electricity, low voltage {IT}   market for   Alloc Def, S       | Ecoinvent 3 | MJ             |
| <b>Trasporto materiali residui</b>                 |   |             |                |
| Trasporto/Road                                     | Truck 28t   | LCA Food DK | tkm            |

Nella tabella che segue sono riportati i consumi energetici attribuibili alla fase di fine vita dell'edificio.

Tab. 4.3.3.4 Consumi energetici fase di fine vita [10].

| Impiego  | Dati input                                  |
|--|---|
| Energia elettrica attrezzi smontaggio              | 500 MJ                                      |
| Martello demolitore (uso escavatore)               | 0,5 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> demolito |
| Movimentazione e carico macerie con pala meccanica | 0,5 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> demolito |
| Trasporto macerie con autoarticolato               | 20 tkm                                      |
| Energia elettrica per frantoio                     | 1.344 kWh/t                                 |

Nella tabella seguente sono descritti i flussi percentuali dei vari materiali nelle tre fasi che caratterizzano il fine vita dell'edificio.

Tab. 4.3.3.5 Destinazioni di fine vita e flussi percentuali dei vari materiali [10].

| <b>Materiale</b>                                | <b>Demolizione<br/>selettiva</b> | <b>Demolizione<br/>controllata</b> | <b>Trattamento<br/>macerie</b>                      |
|---|----------------------------------|------------------------------------|---|
| Acciai  | 95% al riciclo                   | 5% al riciclo                      | -   |
| Ferri d'armatura                                | -                                | 70% al riciclo                     | 30% al riciclo                                      |
| Calcestruzzi, materiali<br>cementizi e ceramici | -                                | -                                  | 100% al riciclo e<br>trasformazione in<br>aggregati |
| Legno travi copertura                           | 90% al riuso                     | 10%<br>termovalorizzazione         | -   |
| Legno in listelli                               | 50% al riuso                     | 50%<br>termovalorizzazione         | -   |
| Lana di legno<br>copertura                      | 90% al riuso                     | -                                  | 10% a discarica                                     |
| Lana di legno divisori                          | -                                | -                                  | 100% a discarica                                    |
| Sughero bruno                                   | -                                | -                                  | 100% a discarica                                    |
| Alluminio                                       | 95% al riciclo                   | -                                  | 5% al riciclo                                       |
| Vetro   | 100% al riciclo                  | -                                  | -   |
| Rame e leghe                                    | 40% al riciclo                   | 60% al riciclo                     | -   |
| Plastiche                                       | -                                | 50% a discarica                    | 50% a discarica                                     |
| Carta   | -                                | -                                  | 100% a discarica                                    |
| Residui dopo il<br>trattamento macerie          | -                                | -                                  | 100% a discarica                                    |

Tab. 4.3.3.6 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità e tipo di rifiuto fine vita (processi di riciclo e riuso).

|                                    | Categoria SimaPro   | Processo SimaPro  | Banca dati  | Unità | Rifiuto pred.     |
|------------------------------------|---|---|-------------|-------|-------------------|
| <b>Processi di riciclo e riuso</b> |   |   |             |       |                   |
| Acciaio                            | Processo di smaltimento/Transformation/Recycling          | Steel and iron (waste treatment) {GLO}   recycling of steel and iron   Alloc Def, S                                       | Ecoinvent 3 | kg    | Ferro metals      |
| Alluminio                          | Processo di smaltimento/Transformation/Recycling          | Aluminium (waste treatment) {GLO}   recycling of aluminium   Alloc Def, S   | Ecoinvent 3 | kg    | Aluminium         |
| Vetro                              | Processo di smaltimento/Transformation/Recycling          | Packaging glass, white (waste treatment) {GLO}   recycling of packaging glass, white   Alloc Def, S                       | Ecoinvent 3 | kg    | Glass             |
| Legno                              | Processo di smaltimento/Altri                             | Riuso legno   | -           | kg    | Spruce wood [...] |
| Lana di legno copertura            | Processo di smaltimento/Altri                             | Riuso lana legno copertura  | -           | kg    | Wood wool [...]   |
| Rame e leghe                       | Processo di smaltimento/Transformation/Others             | Copper scrap, sorted, pressed (waste treatment) {RER}   treatment of copper scrap by electrolytic refining   Alloc Def, S | Ecoinvent 3 | kg    | Coppers           |
| Laterizi                           | Processo di smaltimento/Transformation/Construction waste | Waste brick (waste treatment) {CH}   treatment of, recycling   Alloc Def, S   | Ecoinvent 3 | kg    | Tutti i tipi      |
| Materiali cementizi e ceramici     | Processo di smaltimento/Transformation/Construction waste | Waste concrete, not reinforced (waste treatment) {CH}   treatment of, recycling   Alloc Def, S                            | Ecoinvent 3 | kg    | Cement            |

Tab. 4.3.3.7 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità e tipo di rifiuto fine vita (processi di smaltimento e termovalorizzazione).

|  | Categoria SimaPro   | Processo SimaPro   | Banca dati  | Unità | Rifiuto pred. |
|--|---|--|-------------|-------|---------------|
| <b>Processi di smaltimento e termovalorizzazione</b> |   |  |             |       |               |
| Legno  | Processo di smaltimento/Transformation/Incineration               | Waste wood, untreated (waste treatment) {CH}   treatment of waste wood, untreated, municipal incineration   Alloc Def, S | Ecoinvent 3 | kg    | Wood          |
| Plastiche  | Processo di smaltimento/Landfill/Sanitary Landfill                | Landfill of plastic waste EU-27  | ELCD        | kg    | Tutti i tipi  |
| Plastiche  | Processo di smaltimento/Landfill/Sanitary Landfill                | Landfill of plastic waste EU-27  | ELCD        | kg    | Tutti i tipi  |
| Sughero e lana di legno                              | Processo di smaltimento/Landfill/Sanitary Landfill                | Landfill of wood products (OSB, particle board) EU-27  | ELCD        | kg    | Tutti i tipi  |
| Carta  | Processo di smaltimento/Landfill/Sanitary Landfill                | Landfill of paper waste EU-27  | ELCD        | kg    | Tutti i tipi  |
| Rifiuti residui                                      | Processo di smaltimento/Transformation/Landfill/Sanitary Landfill | Municipal solid waste (waste treatment) {CH}   treatment of municipal solid waste, sanitary landfill   Alloc Def, S      | Ecoinvent   | kg    | Tutti I tipi  |

## 4.4 Analisi degli impatti ed interpretazione dei risultati

Per la valutazione degli impatti sono stati utilizzati il metodo Cumulative Energy Demand (CED) nella versione 1.08, il metodo Eco-indicator 99 nella versione “Hierarchist perspective” (H) ed il metodo EDIP 2003 nella versione 1.04.

### 4.4.1 Metodo Cumulative Energy Demand (CED)

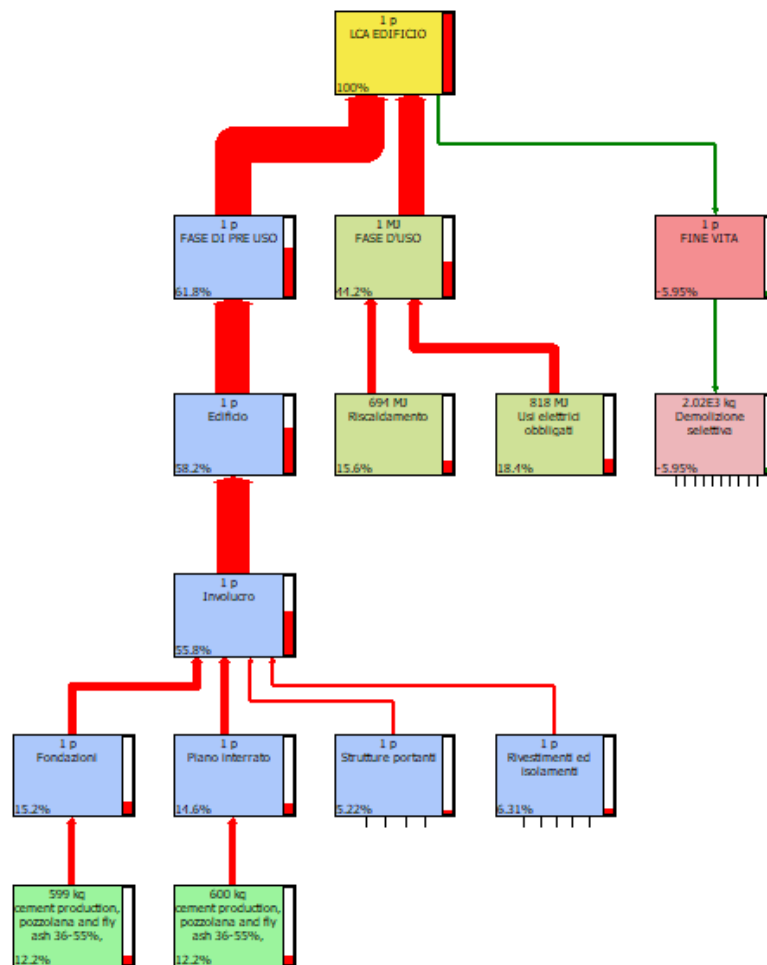


Fig. 4.4.1.1 Rappresentazione ad albero dell'intero ciclo di vita analizzato con il metodo Cumulative Energy Demand; Cut-off 5%.

Come emerge dalla rappresentazione ad albero, la fase energeticamente più impattante risulta essere la fase di pre uso (61,8%) seguita dalla fase d'uso (44,2%). La fase di fine vita presenta un impatto con segno algebrico negativo (-5,95%) ovvero un beneficio ambientale netto.

Tale risultato è in linea con i risultati di altri studi, descritti nel capitolo 2.3.2, riguardanti edifici a basso consumo energetico.

In particolare appare evidente il ribaltamento di ruolo delle fasi di pre uso ed uso rispetto ad un edificio convenzionale.

In termini di energia primaria alla fase di pre uso è associato un consumo energetico pari a 108,5 MJ/m<sup>2</sup>a, alla fase d'uso un consumo energetico pari a 77,6 MJ/m<sup>2</sup>a e alla fase di fine vita un consumo energetico pari a -10,46 MJ/m<sup>2</sup>a.

Con riferimento alla sola fase di pre uso, l'edificio incide sul consumo di energia di tale fase per il 94,2% mentre il cantiere per solo il 5,8% (quasi esclusivamente attribuibile ai trasporti).

All'interno dell'assembly "Edificio", i consumi energetici maggiori sono attribuibili all'involucro (95,9%) mentre gli impianti pesano per il 4,05%.

Analizzando il solo involucro, il contributo maggiore in termini di consumi energetici è associato alle fondazioni e al piano interrato. Tali elementi edilizi prevedono entrambi per la loro costruzione grandi quantità di cemento (e relative armature in acciaio), elemento avente un alto carico energetico associato.

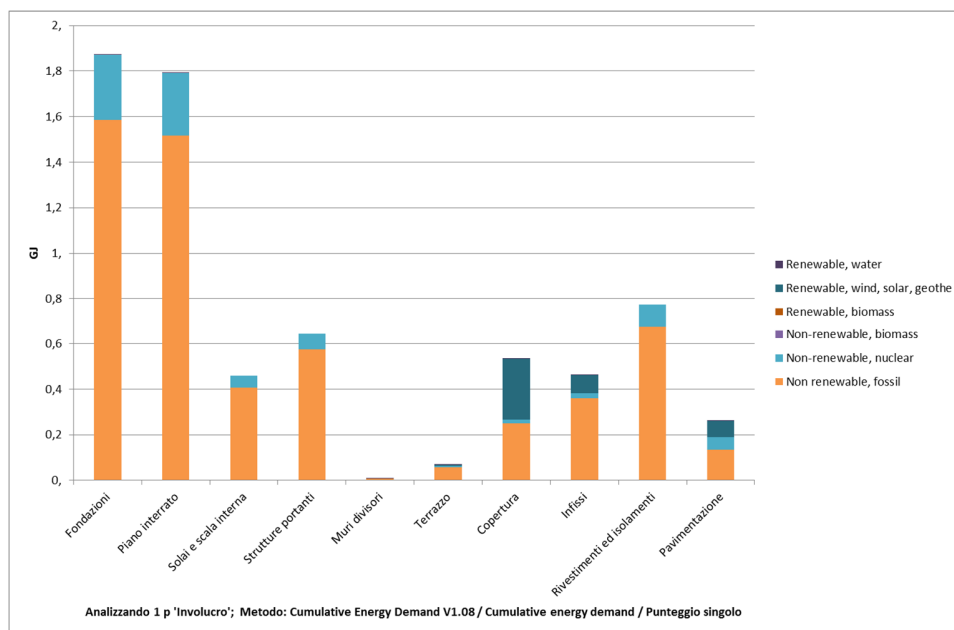


Fig. 4.4.1.2 Analisi di contributo assembly "Involucro" con metodo Cumulative Energy Demand.

Il cemento è infatti l'elemento energeticamente più impattante dell'involucro (3,4 GJ/m<sup>2</sup>), seguito dai laterizi (0,62 GJ/m<sup>2</sup>) e dall'acciaio per le armature (0,43 GJ/m<sup>2</sup>).

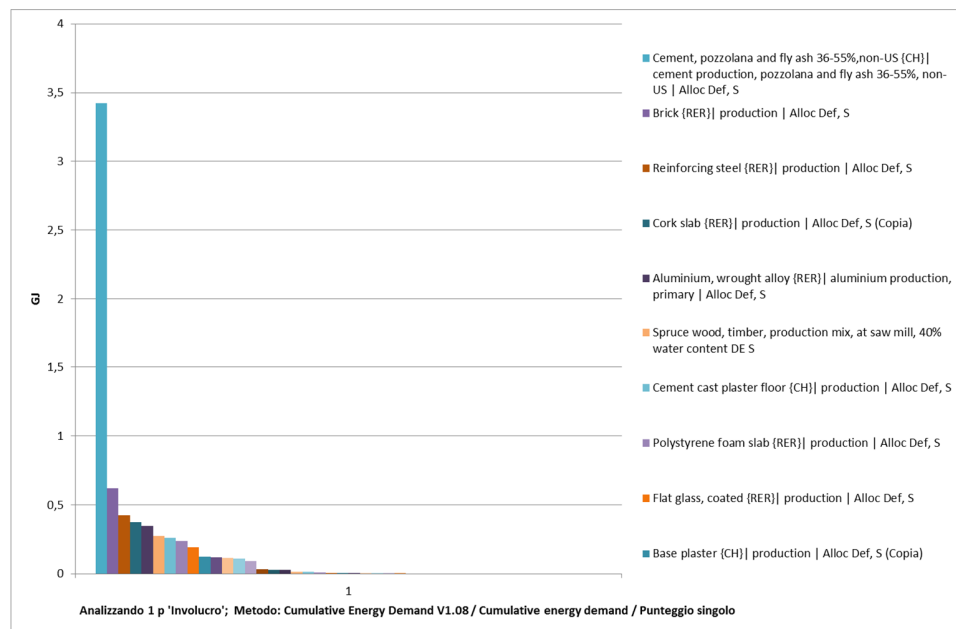


Fig. 4.4.1.3 Analisi di contributo materiali involucro con metodo Cumulative Energy Demand.

Per quanto riguarda gli impianti, dal grafico seguente si può osservare come l'impianto idrico-sanitario risulta essere quello che richiede più energia (130,8 MJ/m<sup>2</sup>), seguito dall'impianto di ventilazione meccanica (76,67 MJ/m<sup>2</sup>), dall'impianto termico (55,9 MJ/m<sup>2</sup>), dall'impianto elettrico (26,6 MJ/m<sup>2</sup>).

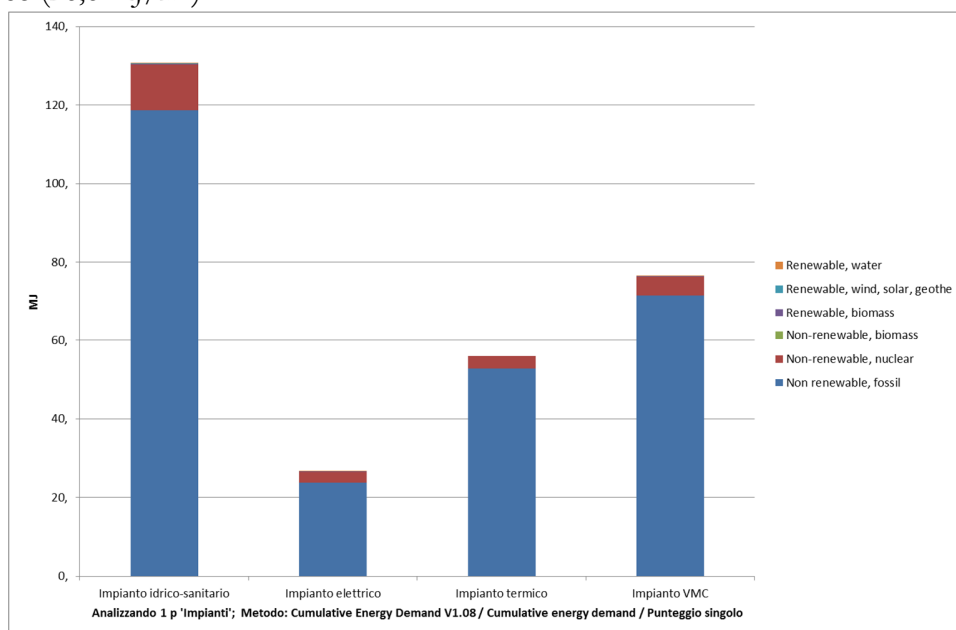


Fig. 4.4.1.4 Analisi di contributo assembly "Impianti" con metodo Cumulative Energy Demand.

Analizzando il contributo dei materiali costituenti gli impianti, i più impattanti in termini energetici risultano essere l'acciaio inox (99,2 MJ/m<sup>2</sup>), l'HDPE (67,1 MJ/m<sup>2</sup>) e l'alluminio (42,4 MJ/m<sup>2</sup>). Tutti questi tre materiali rappresentano una quota significativa dei materiali necessari per l'impianto idrico-sanitario.

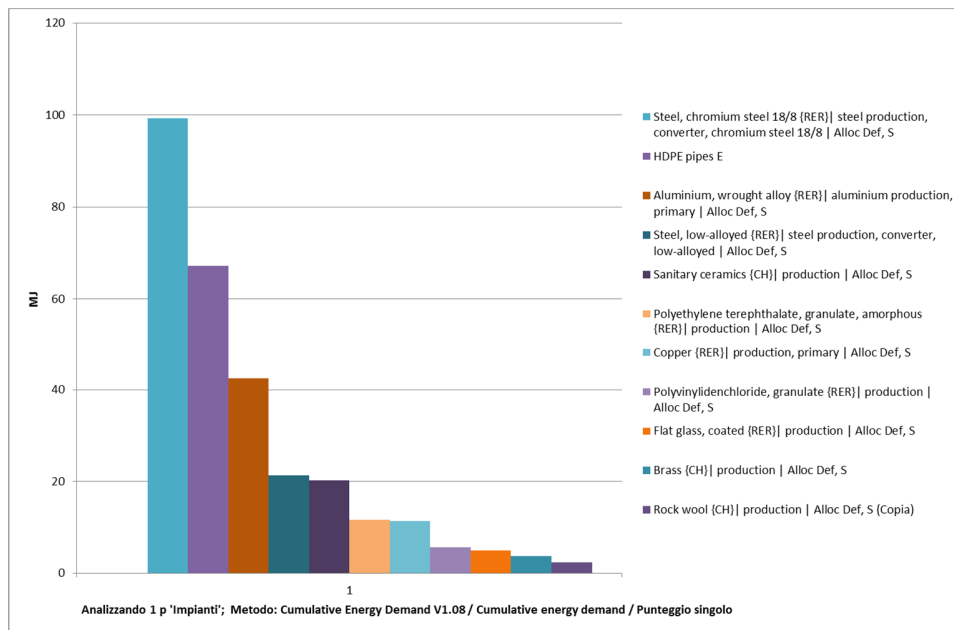


Fig. 4.4.1.5 Analisi di contributo materiali impianti con metodo Cumulative Energy Demand.

La fase di fine vita incide favorevolmente sul bilancio energetico complessivo (-5,95%), grazie ai processi di riciclo e riuso dei materiali derivanti dalla demolizione dell'edificio.



#### 4.4.2 Metodo Eco-indicator 99 (H)

Per maggiore chiarezza nell'interpretazione dei risultati, si riportano solo la fase iniziale di caratterizzazione e il punteggio singolo finale, tralasciando le fasi intermedie di valutazione dei danni, normalizzazione e pesatura.

##### Caratterizzazione

Si riportano di seguito i risultati relativi alla fase di caratterizzazione, suddivisi per categoria di impatto, espressi sia nelle rispettive unità di misura sia in termini percentuali.

Tab. 4.4.2.1 Analisi ciclo di vita con metodo Eco-indicator 99; Caratterizzazione.

| <b>Categoria d'impatto</b>       | <b>Unità</b> | <b>Totale</b> | <b>FASE DI PRE USO</b> | <b>FASE D'USO</b> | <b>FINE VITA</b> |
|----------------------------------|--------------|---------------|------------------------|-------------------|------------------|
| Carcinogens                      | DALY         | 0,0003        | 0,0002                 | 6,1E-5            | 4,38E-6          |
| Resp. organics                   | DALY         | 8,3E-7        | 7E-7                   | 1,9E-7            | -6,1E-8          |
| Resp. inorganics                 | DALY         | 0,0008        | 0,0007                 | 0,0002            | -1,9E-5          |
| Climate change                   | DALY         | 0,0003        | 0,0002                 | 7,1E-5            | -8,08E-6         |
| Radiation                        | DALY         | 3,01E-6       | 1,88E-6                | 1,1E-6            | -2,6E-8          |
| Ozone layer                      | DALY         | 1,03E-7       | 6,54E-8                | 3,8E-8            | -8,9E-10         |
| Ecotoxicity                      | PAF*m2yr     | 467           | 352                    | 72,7              | 43,3             |
| Acidification/<br>Eutrophication | PDF*m2yr     | 20,1          | 16,3                   | 4,4               | -0,57            |
| Land use                         | PDF*m2yr     | 14,8          | 13,7                   | 2                 | -0,9             |
| Minerals                         | MJ surplus   | 96,1          | 95,4                   | 7,3               | -6,59            |
| Fossil fuels                     | MJ surplus   | 1110,18       | 592                    | 527               | -8,82            |

Tab. 4.4.2.2 Analisi ciclo di vita con metodo Eco-indicator 99; Caratterizzazione.

| <b>Categoria di impatto</b>   | <b>FASE DI PRE USO [%]</b> | <b>FASE D'USO [%]</b> | <b>FINE VITA [%]</b> |
|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|
| Carcinogens                   | 75,53                      | 22,83                 | 1,64                 |
| Resp. organics                | 78,78                      | 21,21                 | -7                   |
| Resp. inorganics              | 80,49                      | 19,51                 | -2                   |
| Climate change                | 74,92                      | 25,08                 | -3                   |
| Radiation                     | 61,92                      | 38,08                 | -1                   |
| Ozone layer                   | 62,94                      | 37,06                 | -1                   |
| Ecotoxicity                   | 75,19                      | 15,54                 | 9,27                 |
| Acidification/ Eutrophication | 78,76                      | 21,23                 | -3                   |
| Land use                      | 87,22                      | 12,77                 | -6                   |
| Minerals                      | 92,89                      | 7,10                  | -6                   |
| Fossil fuels                  | 52,87                      | 47,12                 | -1                   |

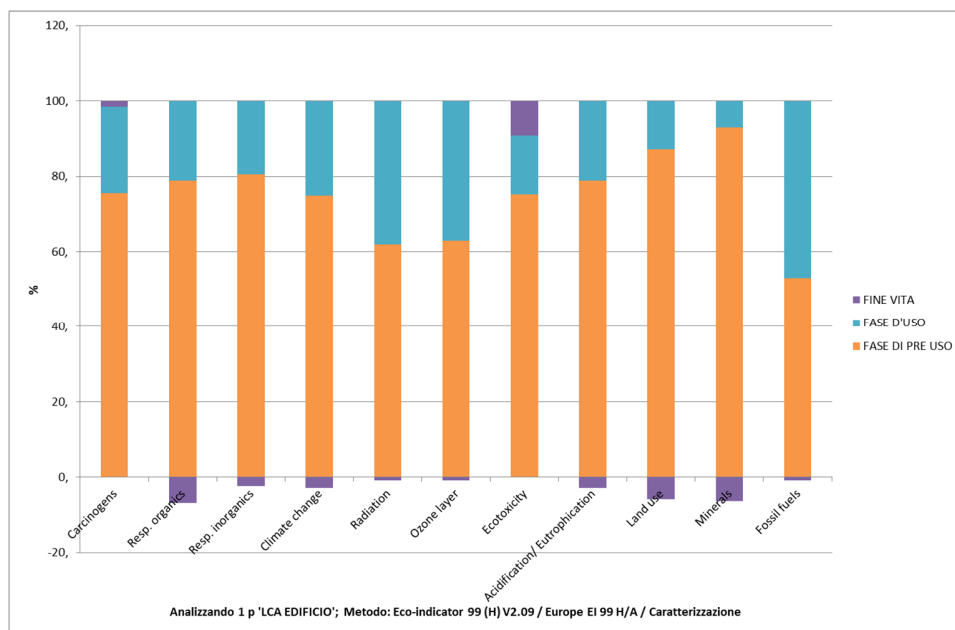


Fig. 4.4.2.1 Analisi intero ciclo di vita con metodo Eco-indicator 99; Caratterizzazione.

Analizzando i dati relativi agli impatti, è possibile fare le seguenti osservazioni:

- Nella fase di pre uso le categorie di impatto più rilevanti sono “Minerals” (92,9%) e “Land use” (87,2%), entrambe legate all'estrazione delle materie prime necessarie alla costruzione dell'edificio.
- Nella fase d'uso la categoria di impatto più importante è “Fossil fuels” (47,1%) a causa del consumo di combustibili fossili per la produzione di energia elettrica.
- Nella fase di fine vita, a causa delle emissioni in acqua, aria e suolo dovute allo smaltimento dei rifiuti, la categoria di impatto “Ecotoxicity” risulta la più rilevante (9,3%) e l'unica assieme alla categoria “Carcinogens” ad avere segno algebrico positivo.

### Punteggio singolo

Si riportano di seguito, sotto forma di tabella e di diagramma, i risultati in termini di punteggio.

Tab. 4.4.2.3 Analisi ciclo di vita con metodo Eco-indicator 99; Punteggio singolo.

| Categoria di danno | Unità | Totale | FASE DI PRE USO | FASE D'USO | FINE VITA |
|--------------------|-------|--------|-----------------|------------|-----------|
| Totale             | Pt    | 99,8   | 72,5            | 28,7       | -1,28     |
| Human Health       | Pt    | 62,2   | 49,7            | 13,5       | -1,07     |
| Ecosystem Quality  | Pt    | 5,7    | 4,55            | 0,95       | 0,19      |
| Resources          | Pt    | 32     | 18,2            | 14,2       | -0,408    |

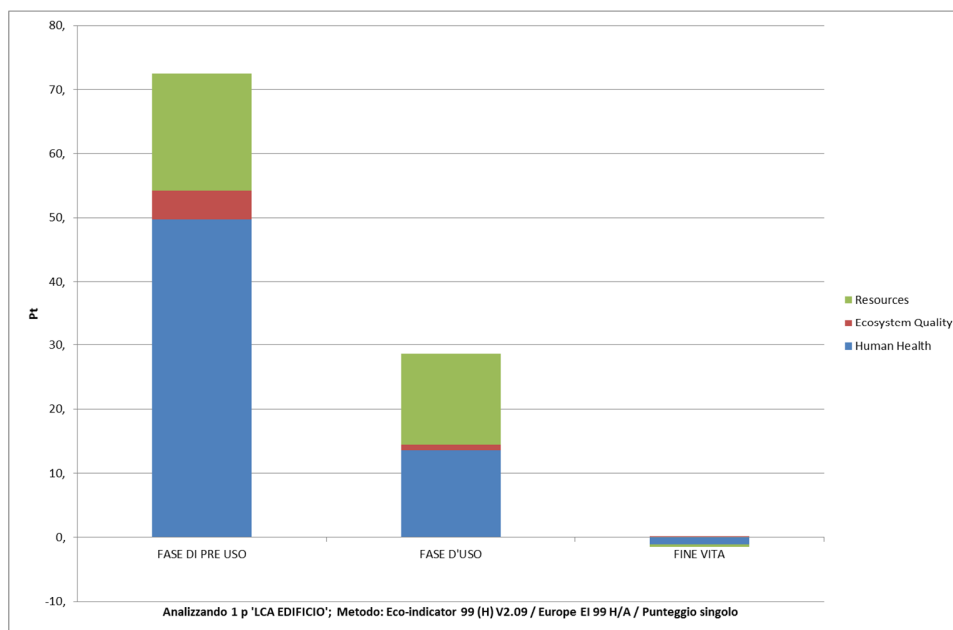


Fig. 4.4.2.2 Analisi intero ciclo di vita con metodo Eco-indicator 99; Punteggio singolo.

Si può notare come in tutte le categorie di danno, la fase più impattante sia la fase di pre uso con un danno totale pari a 72,5 Pt. All'interno della fase di pre uso la categoria di danno più importante è "Human Health" con un punteggio più che doppio rispetto alla categoria "Resources".

All'interno della fase d'uso, le categorie più rilevanti sono "Human Health" e "Resources" che sono pressoché equivalenti in termini di punteggio.

La fase di fine vita presenta punteggi bassi in tutte le categorie di danno, tutti negativi tranne nella categoria "Ecosystem quality".

Il contributo di ogni fase del ciclo di vita dell'edificio (e delle rispettive sotto-fasi) al danno complessivo, in termini percentuali, può essere visualizzato chiaramente nella rappresentazione ad albero riportata nella pagina seguente.

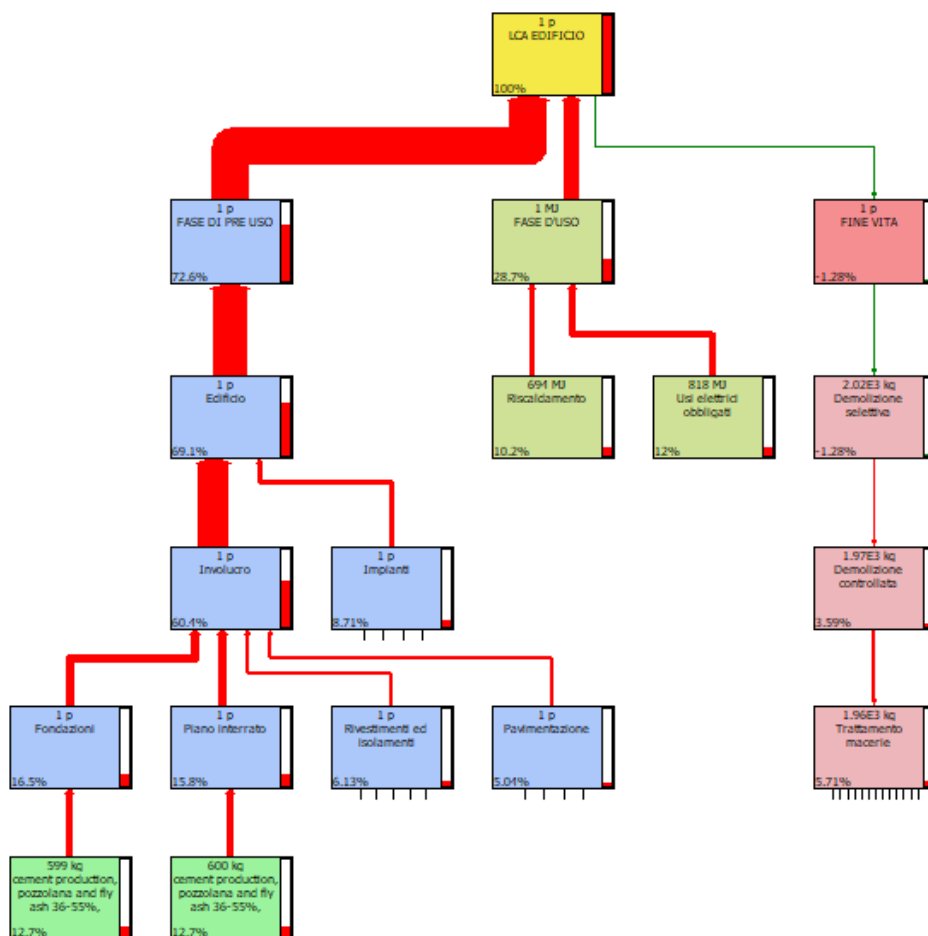


Fig. 4.4.2.3 Rappresentazione ad albero dell'intero ciclo di vita analizzato con il metodo Eco-indicator 99; Cut-off 5%.

La fase di pre uso contribuisce per il 72,6% al danno complessivo, la fase d'uso per il 28,7% e la fase di fine vita per il -1,28%.

Nella fase d'uso gli impatti maggiori sul ciclo di vita sono associati ai consumi energetici maggiori ovvero usi elettrici obbligati (12%) e riscaldamento (10,2%).

Con riferimento all'intero ciclo di vita, nella fase di pre uso l'impatto maggiore è causato dall'edificio (69,1%) ed in particolare dall'involucro (60,4%).

La fase di costruzione (che comprende anche il trasporto dei materiali) incide per il 5% sul danno complessivo.

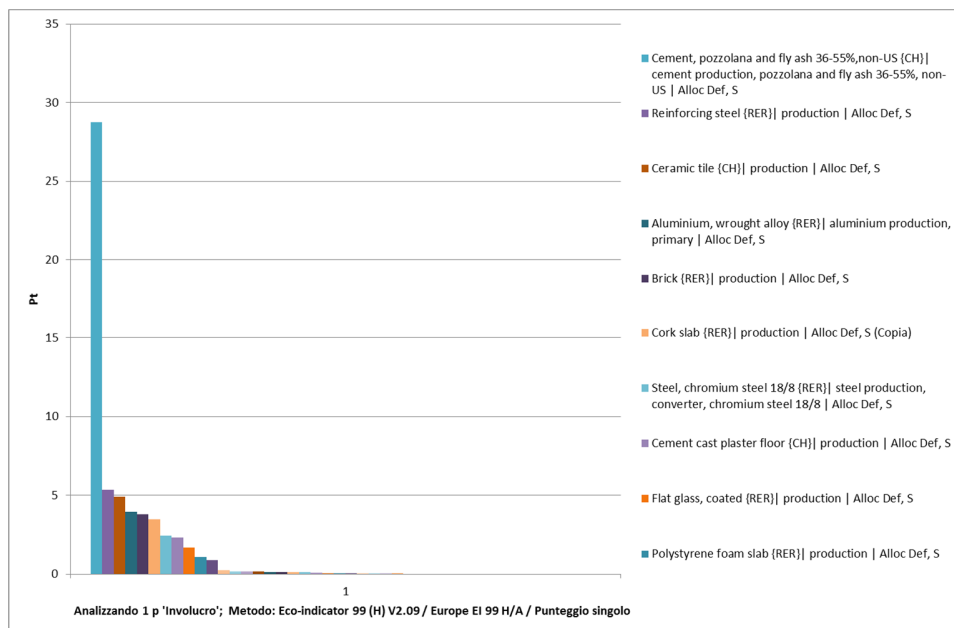


Fig. 4.4.2.4 Analisi di contributo materiali involucro con metodo Eco-indicator 99.

Analizzando gli impatti dovuti all'involucro si nota come sia predominante quello legato alla produzione del cemento (28,7 Pt). Questo è dovuto da un lato all'elevato carico ambientale associato alla produzione del cemento, dall'altro alla quantità di cemento utilizzata nell'edificio. Come si può notare dal diagramma seguente, il cemento rappresenta infatti il 68% in massa dei materiali costituenti l'involucro edilizio.

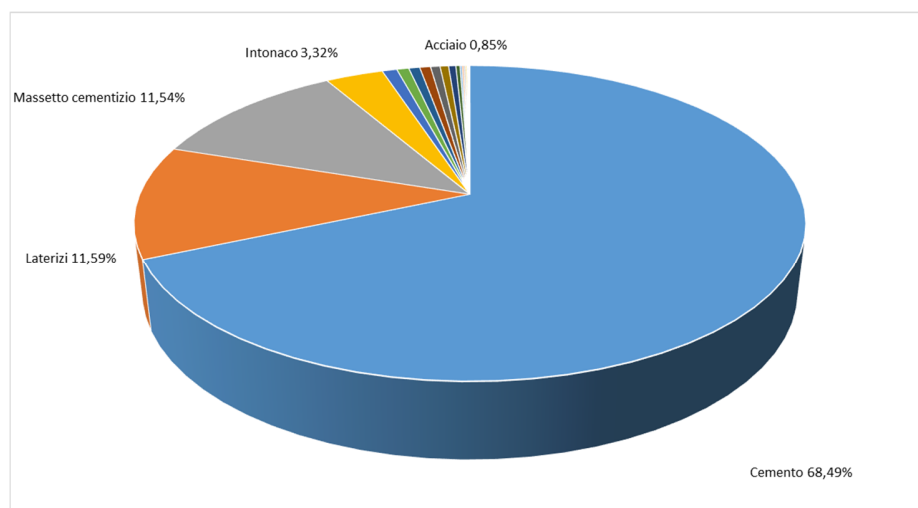


Fig. 4.4.2.5 Composizione percentuale in massa dell'involucro edilizio.

Sempre con riferimento all'involucro, analizzando i risultati della fase di caratterizzazione, si può notare come le fondazioni risultino l'elemento edilizio più impattante in otto categorie su undici, incidendo mediamente per il 30% sull'impatto totale.

Si può notare inoltre un peso rilevante (63,3% dell'impatto totale) dei rivestimenti ed isolamenti nella categoria "Land use".

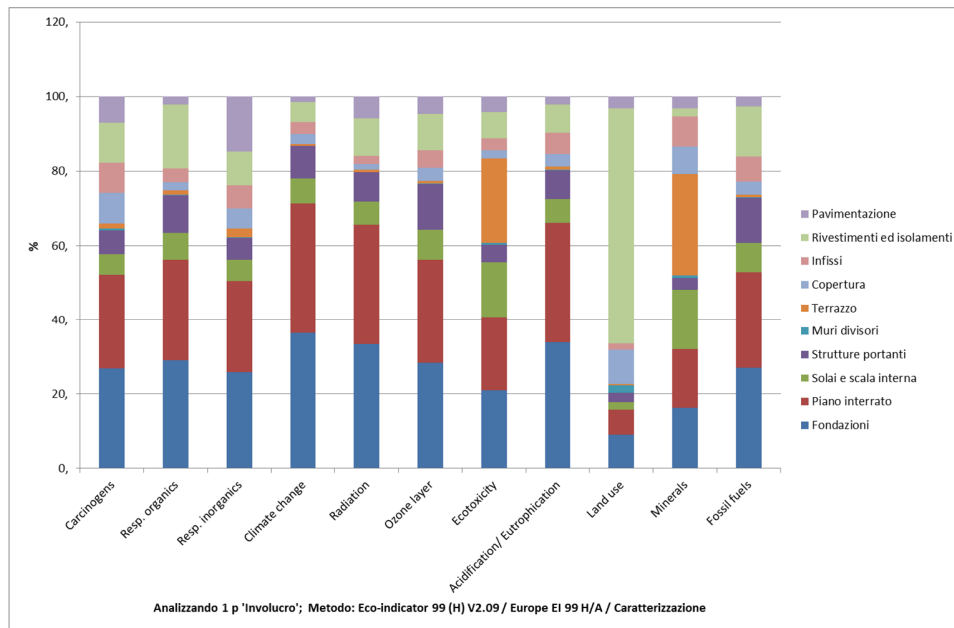


Fig. 4.4.2.6 Analisi di contributo assembly "Involucro" con metodo Eco-indicator 99; Caratterizzazione.

Gli impianti contribuiscono per l'8,7% al danno complessivo associato al ciclo di vita dell'edificio. È interessante notare come l'impianto elettrico che era risultato essere il meno impattante in termini energetici con il metodo Cumulative Energy Demand, dal punto di vista dei danni ambientali risulta essere il più impattante, soprattutto a causa del rame presente nei cavi.

Seguono, in ordine decrescente in termini di impatti, l'impianto idrico-sanitario, l'impianto di ventilazione meccanica controllata e l'impianto termico.

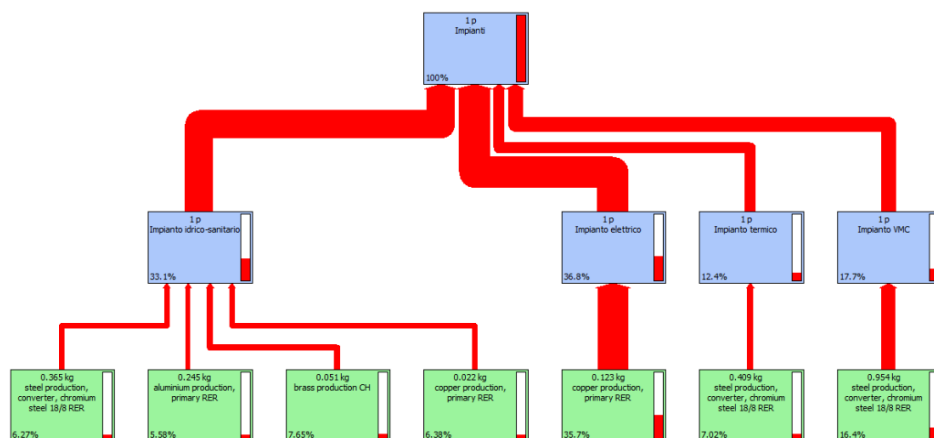


Fig. 4.4.2.7 Rappresentazione ad albero dell'assembly "Impianti" analizzata con il metodo Eco-indicator 99;  
Cut-off 5%.

La fase di fine vita presenta un valore negativo sul danno complessivo (-1,28%) e quindi un beneficio ambientale netto grazie ai processi di riciclo e riuso dei materiali derivanti dalla demolizione dell'edificio (in particolare riciclo di alluminio ed acciaio).

#### 4.4.3 Metodo EDIP 2003

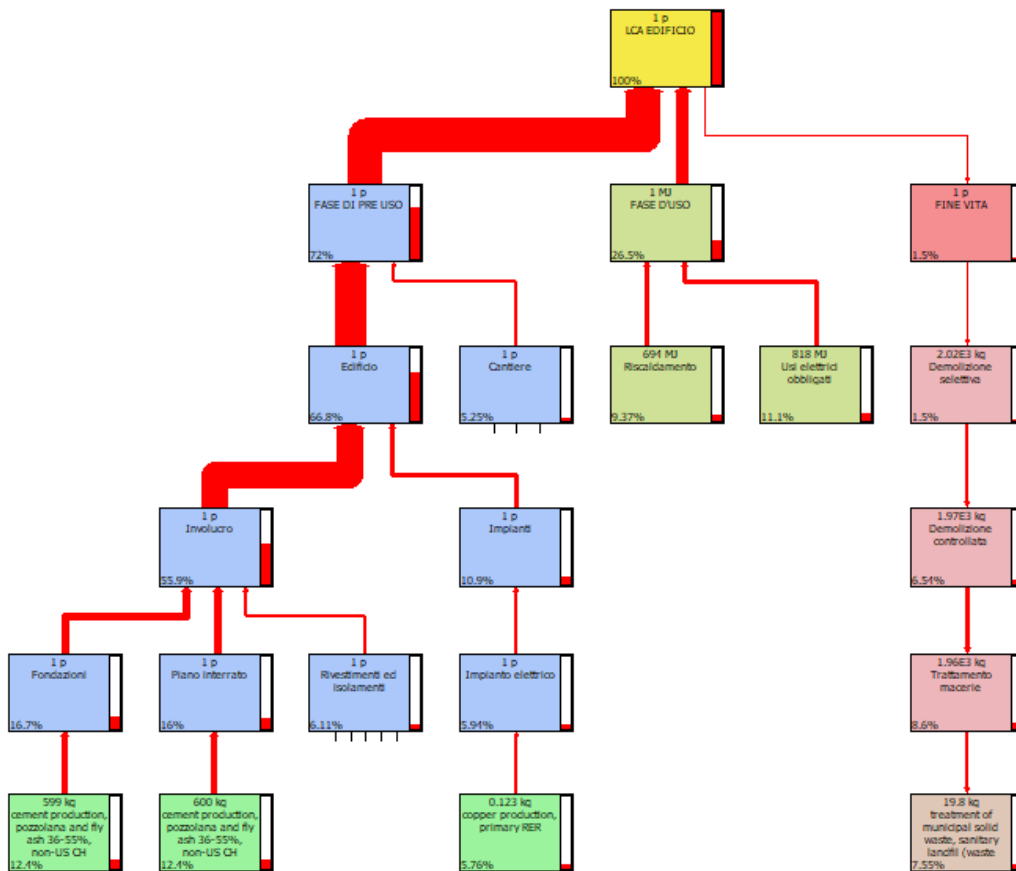


Fig. 4.4.3.1 Rappresentazione ad albero dell'intero ciclo di vita analizzato con il metodo EDIP 2003; Cut-Off 5%.

Osservando la rappresentazione ad albero del ciclo di vita si può notare come, a differenza dei metodi CED ed Eco-indicator 99, la fase di fine vita non incide più in modo favorevole sul bilancio ambientale complessivo; a causa del maggior peso assegnato ai processi più impattanti del fine vita (smaltimento in discarica, consumi energetici, movimentazione e trasporto materiali) tale fase pesa infatti per l'1,5% del danno complessivo.

La fase di pre-uso e la fase d'uso incidono in termini percentuali sul ciclo di vita più o meno come quanto evidenziato con il metodo Eco-indicator 99.

Come per il metodo Eco-indicator 99, si riportano solo i dati relativi alla fase iniziale di caratterizzazione e alla punteggio singolo finale, tralasciando le fasi intermedie di normalizzazione e pesatura.



### Caratterizzazione

Nel diagramma seguente sono riportati i risultati in percentuale per ogni categoria di impatto.

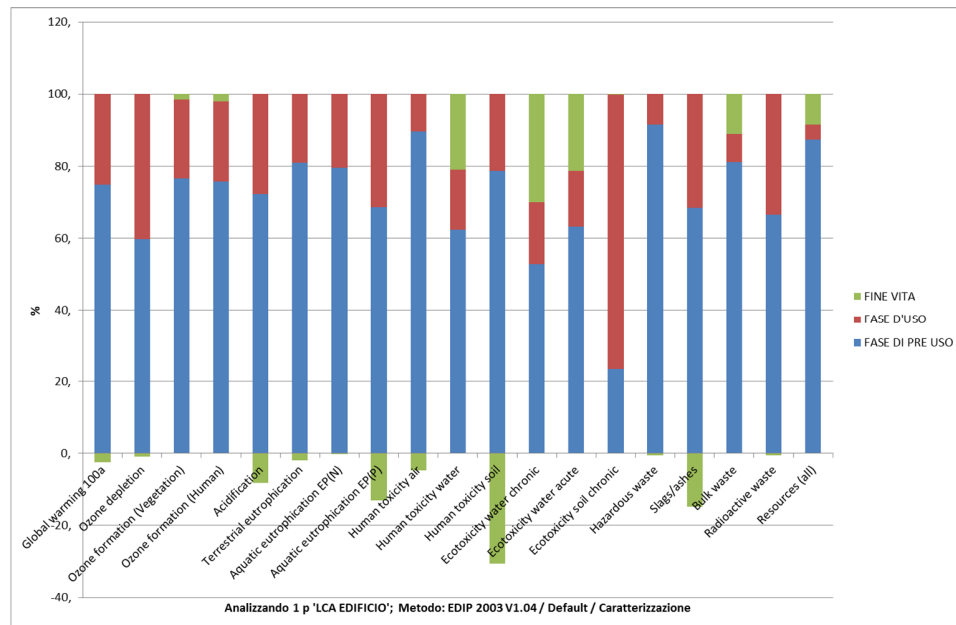


Fig. 4.4.3.2 Analisi intero ciclo di vita con metodo EDIP 2003; Caratterizzazione.

Si può notare come la fase di pre uso è quella più rilevante in tutte le categorie, eccetto nella categoria “Ecotoxicity soil chronic” dove prevale la fase d’uso.

La fase di fine vita assume valori con segno algebrico positivo nelle categorie “Ozone formation (Vegetation)”, “Ozone formation (Human)”, “Aquatic eutrophication EP(N)”, “Human toxicity water”, “Ecotoxicity water chronic”, “Ecotoxicity water acute”, “Ecotoxicity soil chronic”, “Bulk waste” e “Resources (all)”.

Nella tabella seguente si riportano le categorie di impatto (con le corrispondenti unità di misura) più rilevanti per l’interpretazione dei risultati.

Tab. 4.4.3.1 Analisi ciclo di vita con metodo EDIP 2003; Caratterizzazione.

| Categoria d’impatto        | Unità                 | Totale | FASE DI PRE USO | FASE D’USO | FINE VITA |
|----------------------------|-----------------------|--------|-----------------|------------|-----------|
| Global warming 100a        | kg CO <sub>2</sub> eq | 1317   | 1010            | 342        | -34,4     |
| Ozone depletion            | kg CFC11 eq           | 0,0001 | 6,2E-5          | 4,17E-5    | -9,02E-7  |
| Acidification              | m <sup>2</sup>        | 76,2   | 60,1            | 23         | -6,84     |
| Terrestrial eutrophication | m <sup>2</sup>        | 79,1   | 65,3            | 15,3       | -1,51     |

### Punteggio singolo

Nel diagramma di seguito riportato sono rappresentati, per ogni fase del ciclo di vita, l'incidenza in termini di punteggio delle diverse categorie di impatto.

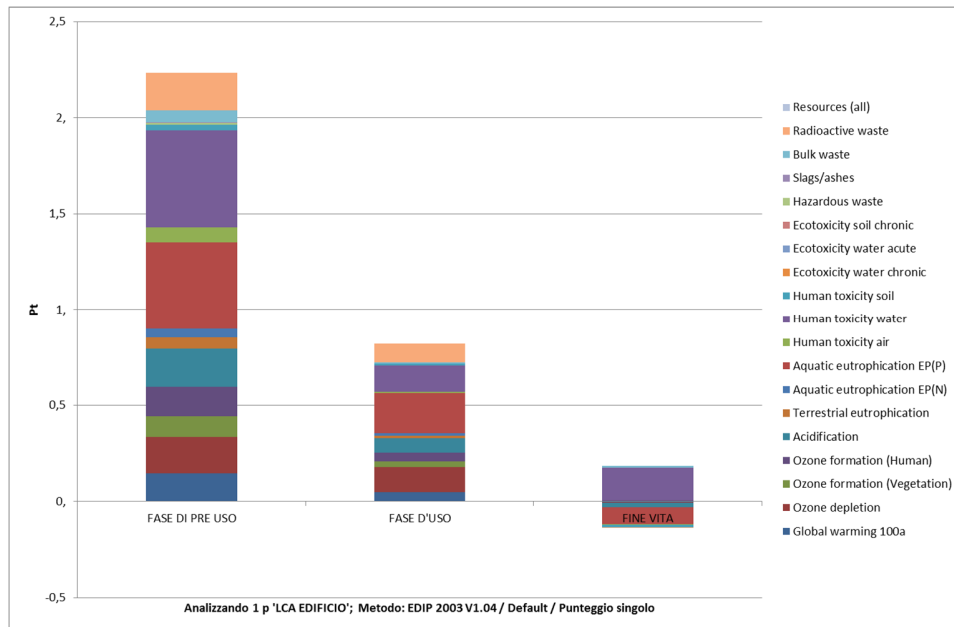


Fig. 4.4.3.3 Analisi dell'intero ciclo di vita con il metodo EDIP 2003; Punteggio singolo.

La categoria di impatto più rilevante per la fase di pre uso è “Human toxicity water” (0,5 Pt), per la fase d'uso è “Aquatic eutrophication EP(P)” (0,2 Pt) e per la fase di fine vita è “Human toxicity water” (0,17 Pt).

Per quanto riguarda i componenti della fase di pre uso (edificio, cantiere, impianti), le considerazioni che possono essere fatte in merito agli impatti ambientali, sono analoghe a quelle relative al metodo Eco-indicator 99.

#### 4.4.4 Analisi di un diverso modello di edificio: integrazione di un impianto fotovoltaico

Si è ipotizzato di inserire nel modello dell'edificio un impianto fotovoltaico per ridurre i consumi di energia elettrica in fase d'uso. In particolare si è scelto un impianto da 3 kW<sub>p</sub> da installare sulla porzione di tetto rivolta ad est.

Dal software Pv-gis è stato ricavato il valore della radiazione solare media annuale sul piano dei moduli fotovoltaici (azimut: -90°; inclinazione: 18°) per la località di Padova (45°24'23" N, 11°52'36" E): E<sub>ma</sub>=1420 kWh/m<sup>2</sup>.

Dalla scheda tecnica di un modulo fotovoltaico ad alta efficienza (P<sub>mod</sub>=310 Wp) prodotto da un'azienda italiana, è stato ricavato un valore per l'efficienza del modulo η<sub>mod</sub>=19,03% ed il peso (17,9 kg).

$$n = \frac{P_p}{P_{mod}} = \frac{3}{0,31} = 9 \text{ moduli}; \quad P_{tot} = 9 \cdot 0,31 = 2,79 \text{ kW}; \quad A = \frac{2,79}{0,19} = 14,7 \text{ m}^2$$

Assumendo un rendimento complessivo di tutti i componenti dell'impianto η<sub>BOS</sub> (Balance Of System) pari a 0,8 è stata ottenuta l'energia attesa prodotta annualmente dall'impianto: E<sub>el</sub>=E<sub>ma</sub> · η<sub>mod</sub> · η<sub>BOS</sub> · A=3172 kWh.

Solo una parte di tale energia contribuisce alla riduzione dei consumi elettrici, la restante parte viene ceduta alla rete. Dal "Rapporto statistico solare fotovoltaico 2016" del GSE (Gestore Servizi Energetici) [31] si è ricavato per la regione Veneto un valore medio di autoconsumo su base annuale pari al 40%.

La riduzione dei consumi elettrici, grazie all'impianto fotovoltaico, risulta dunque essere pari a 1268,8 kWh/a.

Nel modello in SimaPro, oltre a ridurre il consumo energetico in fase d'uso, è stata creata nella fase di pre uso l'assembly "Impianto fotovoltaico" contenente i processi "Photovoltaic panel, single-Si wafer {RER} | production | Alloc Def, S" per i moduli fotovoltaici e "Inverter, 2.5kW {RER} | production | Alloc Def, S" per l'inverter.

Da quest'ultimo processo è stato estratto il peso dell'inverter (18,5 kg).

Noto il peso dei moduli e dell'inverter, è stata inserita la fase di trasporto mediante il processo "Delivery van <3.5t" (distanza 50 km).

Per entrambi questi componenti la durata è stata ipotizzata pari a quella degli altri impianti ovvero 35 anni. Non sono state considerate eventuali manutenzioni e non è stato considerato il degradamento delle prestazioni dei moduli nel tempo.

Tab. 4.4.4.1 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità impianto fotovoltaico.

| Categoria SimaPro        | Processo SimaPro  | Banca dati  | Unità          |
|--------------------------|---|-------------|----------------|
| Electronics/Photovoltaic | Photovoltaic panel, single-Si wafer {RER}   production   Alloc Def, S | Ecoinvent 3 | m <sup>2</sup> |
| Electronics/Photovoltaic | Inverter, 2.5kW {RER}   production   Alloc Def, S                     | Ecoinvent 3 | p              |

Nelle rappresentazioni ad albero seguenti, relative all'intero ciclo di vita e alla sola assembly "Impianti", si può osservare l'effetto dell'inserimento dell'impianto fotovoltaico, valutato con il metodo Cumulative Energy Demand e con il metodo Eco-indicator 99.

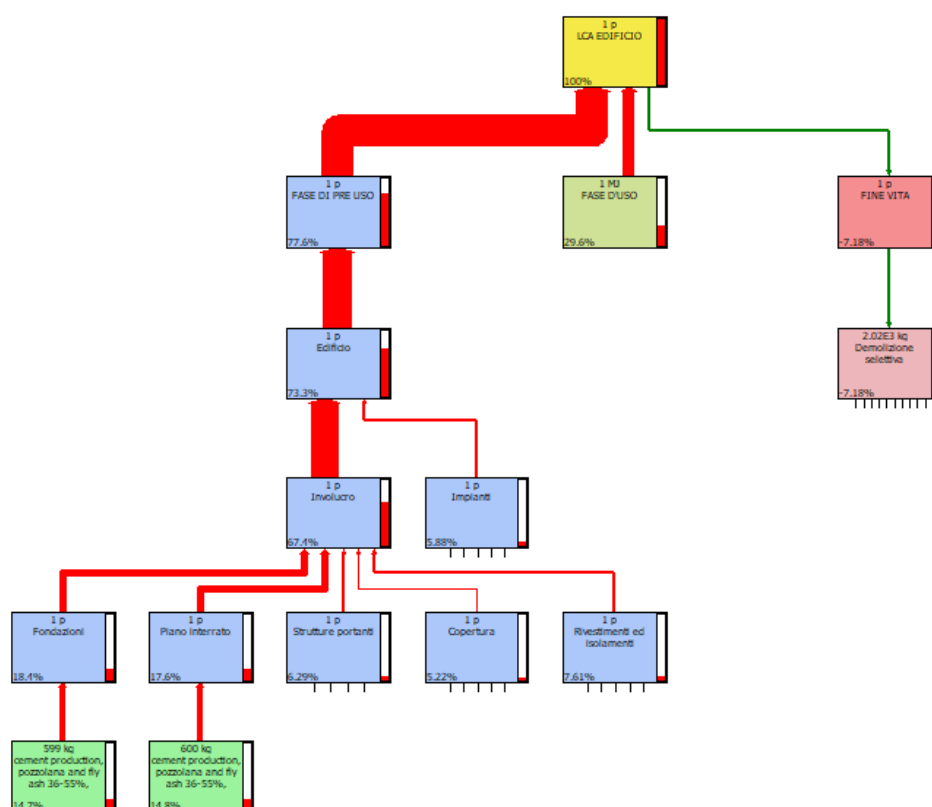


Fig. 4.4.4.1 Rappresentazione ad albero dell'intero ciclo di vita (con impianto PV) analizzato con il metodo Cumulative Energy Demand; Cut-Off 5%.

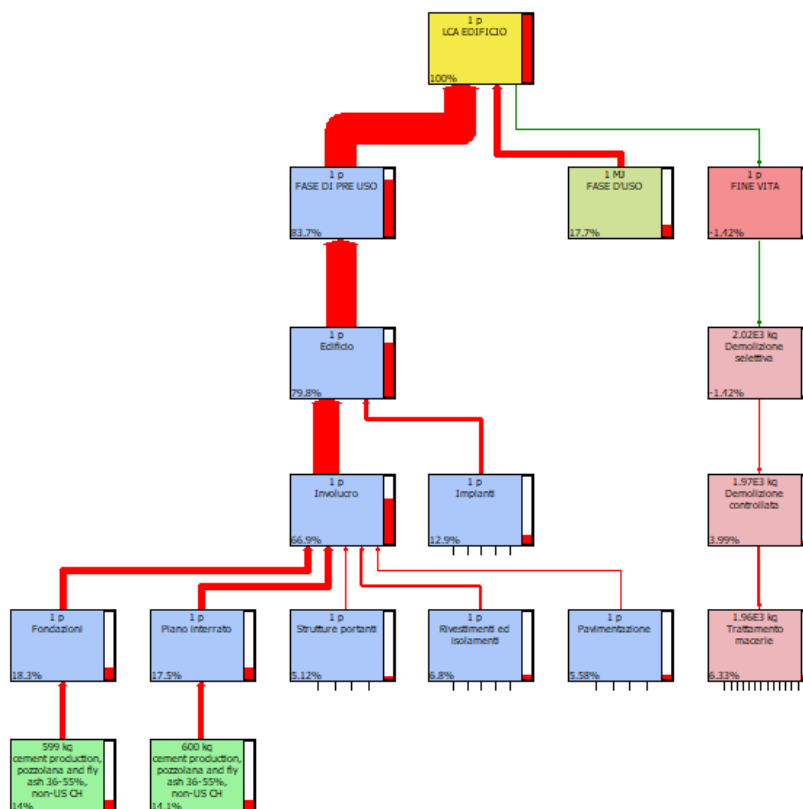


Fig. 4.4.4.2 Rappresentazione ad albero dell'intero ciclo di vita (con impianto PV) analizzato con il metodo Eco-indicator 99; Cut-Off 5%.

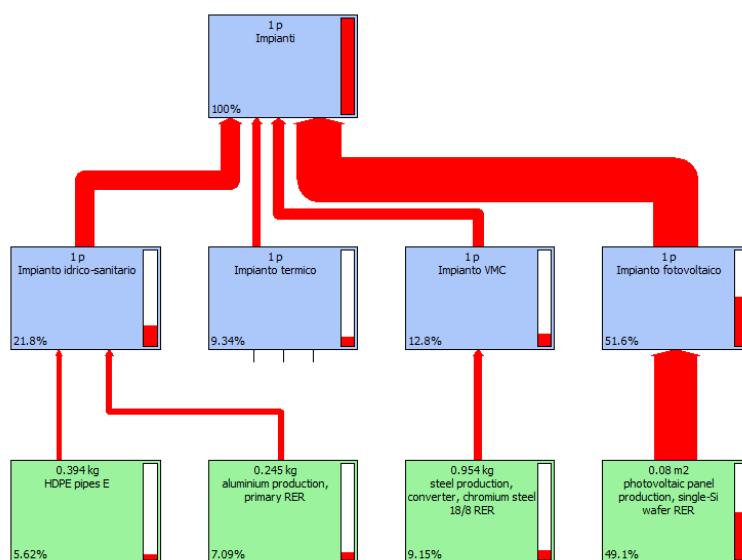


Fig. 4.4.4.3 Rappresentazione ad albero assembly "Impianti" (con impianto PV) analizzata con il metodo Cumulative Energy Demand; Cut-Off 5%.

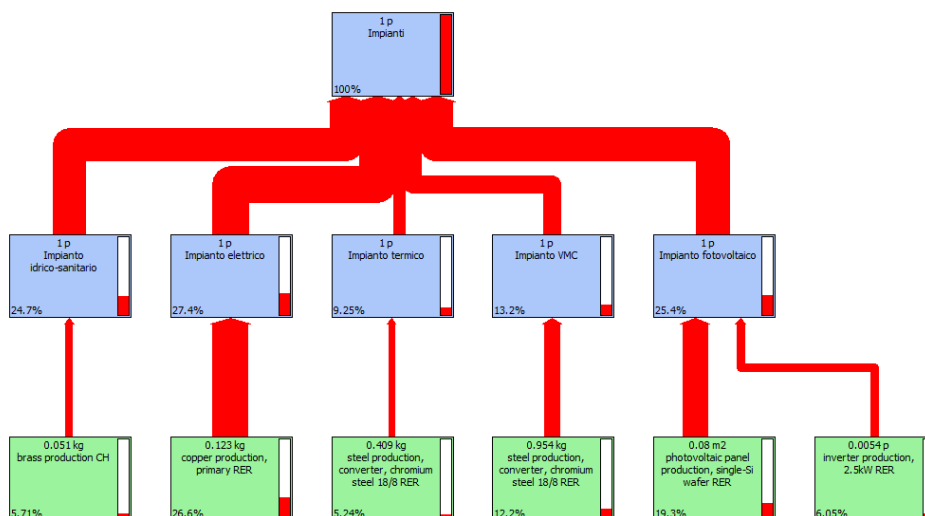


Fig. 4.4.4.3 Rappresentazione ad albero assembly “Impianti” (con impianto PV) analizzata con il metodo Eco-indicator 99; Cut-Off 5%.

In entrambi i metodi, rispetto al modello senza impianto fotovoltaico, si può notare una diminuzione del peso percentuale della fase d’uso sul ciclo di vita ed un corrispondente aumento del peso associato alla fase di pre uso.

Per quanto riguarda l’assembly “Impianti”, l’impianto fotovoltaico diventa il più impattante degli impianti in termini energetici (51,6% del totale) mentre per quanto riguarda gli impatti ambientali valutati con il metodo Eco-indicator 99, risulta paragonabile all’impianto idrico-sanitario e all’impianto elettrico.

Si riporta di seguito un confronto, limitato alla fase di pre uso e alla fase d’uso, tra il modello di edificio senza impianto fotovoltaico e il modello di edificio con impianto fotovoltaico.

Tab. 4.4.4.2 Confronto impatti senza impianto fotovoltaico e con impianto fotovoltaico.

|                            | Senza impianto PV |      |        | Con impianto PV |       |        |
|----------------------------|-------------------|------|--------|-----------------|-------|--------|
|                            | Pre uso           | Uso  | Totale | Pre uso         | Uso   | Totale |
| CED [MJ]/m <sup>2</sup> a] | 108,5             | 77,6 | 175,6  | 113             | 43,14 | 145,7  |
| Human Health [Pt]          | 49,7              | 13,5 | 62,2   | 51,9            | 7,52  | 58,4   |
| Ecosystem Quality [Pt]     | 4,55              | 0,95 | 5,7    | 4,7             | 0,53  | 5,43   |
| Resources [Pt]             | 18,2              | 14,2 | 32     | 18,8            | 7,87  | 26,3   |

Si può osservare come l'inserimento dell'impianto fotovoltaico determini, per tutti gli indicatori, una riduzione dei valori nella fase d'uso (quasi dimezzati per le categorie Human Health e Resources); inoltre si verifica, sempre per tutti gli indicatori, un incremento dei valori relativi alla fase di pre-uso.

Per quanto riguarda i valori totali, si registra una riduzione per tutte le categorie di danno, in particolare per il parametro CED (riduzione del 17% del consumo di energia primaria).

Questo, come evidenziato da altri studi [32], si traduce in una convenienza in termini ambientali a produrre l'energia necessaria alla fase d'uso dell'edificio mediante un impianto fotovoltaico.

Viene inoltre calcolato l'indice di payback energetico (Energy Payback Time, EPBT), definito come il tempo, espresso in anni, necessario all'impianto per produrre una quantità di energia pari a quella spesa nel suo ciclo di vita [41]:

$$EPBT = E_{in}/E_{out} \text{ [anni]}$$

dove:

$E_{in}$  è l'energia primaria spesa dall'impianto fotovoltaico (pannelli ed inverter) nel suo ciclo di vita (produzione, trasporto al sito di installazione, fine vita) valutata con il metodo Cumulative Energy Demand [MJ];

$E_{out}$  è l'energia primaria risparmiata annualmente grazie alla produzione di energia elettrica dell'impianto fotovoltaico [MJ/anno].

Ipotizzando un fattore di conversione da energia elettrica ad energia primaria pari a 2,42 [42], risulta  $EPBT=2,06$  anni.

Tra i vari fattori che influenzano l'indice di payback energetico dell'impianto, l'orientamento dei pannelli fotovoltaici ha un ruolo significativo: assumendo un orientamento ed inclinazione ottimali dei pannelli (azimut:  $0^\circ$ ; inclinazione:  $36^\circ$ ) si ottiene  $EPBT=1,73$  anni.

#### 4.4.5 Analisi di un diverso modello di edificio: isolamento a cappotto in EPS riciclato

È stato effettuato un confronto tra le prestazioni energetiche ed ambientali di due differenti soluzioni di isolamento a cappotto realizzate con diversi materiali: il sughero bruno (previsto nel progetto originale dell'edificio) e l'EPS riciclato.

Il confronto è stato condotto a parità di resistenza termica dei due materiali; in particolare, nota la conducibilità termica dell'EPS è stato fissato uno spessore che fornisca la stessa resistenza termica data dai 15 cm di sughero dell'isolamento previsto nell'involucro originale. Si è ipotizzato inoltre che i due materiali producano la stessa percentuale di sfridi e necessitino entrambi della stessa manutenzione.

Altri aspetti come convenienza economica, facilità di posa, traspirabilità non sono stati considerati in questa analisi.

Note la densità del sughero, la massa del sughero e la densità dell'EPS sono stati calcolati il volume e la massa necessari per l'isolamento con l'EPS.

Nella tabella seguente sono riportati i risultati principali dei calcoli.

Tab. 4.4.5.1 Dati relativi alle due tipologie di isolanti.

|   | Sughero | EPS riciclato |
|---|---------|---------------|
| Densità $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]     | 130     | 28            |
| Conducibilità termica [W/mK]            | 0,045   | 0,036         |
| Spessore [m]                            | 0,15    | 0,12          |
| Resistenza termica [m <sup>2</sup> K/W] | 3,33    | 3,33          |
| Volume [m <sup>3</sup> ]                | 35,38   | 28,3          |
| Massa [kg]                              | 4600    | 792,6         |

Nell'inventario in SimaPro il materiale EPS riciclato è stato inserito con il processo "Polystyrene foam slab {CH} | production, 100% recycled | Alloc Def, S" della banca dati Ecoinvent 3.

Tab. 4.4.5.2 Corrispondenza categorie, processi, banca dati SimaPro, unità e tipo di rifiuto EPS.

| Categoria SimaPro                                | Processo SimaPro  | Banca dati  | Unità | Rifiuto |
|--|---|-------------|-------|---------|
| Materiali/Construction/Insulation/Transformation | Polystyrene foam slab {CH}  <br>production, 100% recycled  <br>Alloc Def, S | Ecoinvent 3 | ton   | PS      |



Nella tabella seguente viene riportato un confronto in termini di impatti energetici ed in termini di impatti ambientali nel ciclo di vita dell'edificio, valutati rispettivamente con il metodo Cumulative Energy Demand e con il metodo Eco-indicator 99.

Tab. 4.4.5.3 Confronto impatti energetici ed ambientali nel ciclo di vita con isolamento in sughero e con isolamento in EPS riciclato.

|                 |                            | <b>Sughero</b> | <b>EPS riciclato</b> |
|-----------------|----------------------------|----------------|----------------------|
| Fase di pre uso | CED [MJ]/m <sup>2</sup> a] | 108,5          | 103,5                |
|                 | Human Health [Pt]          | 49,7           | 47,6                 |
|                 | Ecosystem Quality [Pt]     | 4,55           | 3,93                 |
|                 | Resources [Pt]             | 18,2           | 17,5                 |
| Fase d'uso      | CED [MJ]/m <sup>2</sup> a] | 77,6           | 77,6                 |
|                 | Human Health [Pt]          | 13,5           | 13,5                 |
|                 | Ecosystem Quality [Pt]     | 0,95           | 0,95                 |
|                 | Resources [Pt]             | 14,2           | 14,2                 |
| Fine vita       | CED [MJ]/m <sup>2</sup> a] | -10,46         | -10,66               |
|                 | Human Health [Pt]          | -1,07          | -1,24                |
|                 | Ecosystem Quality [Pt]     | 0,19           | 0,23                 |
|                 | Resources [Pt]             | -0,408         | -0,45                |
| Totale          | CED [MJ]/m <sup>2</sup> a] | 175,64         | 170,44               |
|                 | Ecoindicator-99 [Pt]       | 99,8           | 96,26                |

Dai risultati sopra riportati, si può notare come per tutte le categorie, eccetto per la categoria "Ecosystem Quality" nel fine vita, con l'EPS riciclato si ha una diminuzione degli impatti energetici ed ambientali.

Rispetto all'isolamento con il sughero, con l'isolamento in EPS riciclato i consumi energetici della fase di pre uso diminuiscono del 4,6%, quelli della fase di fine vita dell'1,9%.

Globalmente si verifica una riduzione del fabbisogno di energia primaria pari a 5,2 MJ/m<sup>2</sup>a (riduzione del 2,9%).

Tra le categorie di impatto ambientale, la riduzione maggiore si verifica nella categoria "Human Health" relativa alla fase di pre uso (-2,1 Pt) mentre il punteggio totale si riduce di 3,5 Pt.

Utilizzando l'EPS riciclato al posto del sughero si verifica anche una riduzione del peso dell'involucro sul ciclo di vita dell'edificio: in termini percentuali, dal 55,8% al 54,6% sul totale degli impatti energetici e dal 60,4% al 59,1% sul totale degli impatti ambientali.

#### 4.4.6 Analisi di un diverso modello di edificio: durata di vita dell'edificio pari a 50 anni

Si è ipotizzato di ridurre la vita utile dell'edificio da 70 a 50 anni. Per gli impianti si è mantenuta l'ipotesi di una sostituzione nel ciclo di vita, quindi dopo 25 anni. Per i materiali da costruzione sono stati mantenuti gli stessi fattori di efficienza di messa in opera.

I consumi in fase d'uso sono stati calcolati per la nuova durata dell'edificio.

Nella tabella seguente è riportato un confronto tra le due durate dell'edificio in relazione ai principali indicatori di impatto. Poiché la fase di pre uso e la fase di fine vita rimangono invariate, viene riportato un confronto limitato alla fase d'uso ed al totale del ciclo di vita.

Tab. 4.4.6.1 Confronto impatti energetici ed ambientali nel ciclo di vita per due diverse durate di vita dell'edificio.

|            |                          | 70 anni | 50 anni |
|------------|--------------------------|---------|---------|
| Fase d'uso | CED [MJ/m <sup>2</sup> ] | 5432    | 3879,9  |
|            | Human Health [Pt]        | 13,5    | 9,65    |
|            | Ecosystem Quality [Pt]   | 0,95    | 0,68    |
|            | Resources [Pt]           | 14,2    | 10,11   |
| Totale     | CED [MJ/m <sup>2</sup> ] | 12294,8 | 10742,7 |
|            | Ecoindicator-99 [Pt]     | 99,8    | 91,6    |

Osservando i dati riportati in tabella, passando da una durata dell'edificio da 70 a 50 anni, si può notare una riduzione del consumo di energia primaria in fase d'uso pari a 1552,1 MJ/m<sup>2</sup>. Per quanto riguarda gli impatti ambientali, si può notare una riduzione di circa il 28% del punteggio per tutte le categorie nella fase d'uso; tale riduzione scende all'8% con riferimento al totale del ciclo di vita.

Riducendo la durata dell'edificio a 50 anni, si modifica anche il peso delle diverse fasi sul ciclo di vita: in termini di impatti energetici la fase di pre uso passa dal 61,8% al 70,7%, la fase d'uso dal 44,2% al 36,1%, la fase di fine vita dal -5,95% al -6,84%; analogamente per quanto riguarda gli impatti ambientali valutati con il metodo Eco-indicator 99, la fase di pre uso passa dal 72,6% al 73,1%, la fase d'uso dal 28,7% al 28,1%, la fase di fine vita dal -1,28% al -1,26%

#### 4.4.7 Analisi di un diverso modello di edificio: distanza media trasporti pari a 80 km

È stato infine analizzato un diverso modello di edificio, ipotizzando una distanza media di 80 km per il trasporto dei materiali di involucro ed impianti al cantiere. Sono state mantenute tutte le altre ipotesi del caso base.

Passando da una distanza media di 50 km (caso base) ad una distanza media di 80 km, il peso della fase di pre uso passa dal 61,8% al 62,5% sul totale in termini di impatti energetici e dal 72,6% al 73,1% sul totale in termini di impatti ambientali.

Con riferimento alla sola assembly “Trasporti”, il peso in termini percentuali sul ciclo di vita passa dal 3,22% al 5,06% per gli impatti energetici e dal 3,17% al 4,98% per gli impatti ambientali.

Nella tabella seguente viene riportato un confronto tra le due ipotesi di distanza media, in relazione alle principali categorie di impatto

Tab. 4.4.7.1 Confronto impatti energetici ed ambientali nel ciclo di vita per due ipotesi di distanza media per i trasporti.

|                    |                           | 50 km | 80 km |
|--------------------|---------------------------|-------|-------|
| FASE DI<br>PRE USO | CED [MJ/m <sup>2</sup> a] | 108,5 | 111,9 |
|                    | Human Health [Pt]         | 49,7  | 50,6  |
|                    | Ecosystem Quality [Pt]    | 4,55  | 4,77  |
|                    | Resources [Pt]            | 18,2  | 18,9  |

Analizzando i dati e le percentuali sopra riportate, si può notare come aumentando la distanza media del 60% rispetto al caso base, il peso dei trasporti in termini di impatti si mantiene all'interno di valori relativamente bassi sia con riferimento alla fase di pre uso, sia con riferimento all'intero ciclo di vita.



## Conclusioni

L'applicazione della metodologia LCA all'edificio oggetto dello studio ha consentito di evidenziare il ribaltamento di ruolo della fase di pre uso e della fase d'uso relativamente ai consumi energetici: se in un edificio convenzionale la fase d'uso rappresenta il 90-95% dei consumi totali, in un edificio a basso consumo energetico come quello esaminato, tale percentuale scende al 44,2% mentre la fase di pre uso diventa la più importante in termini di energia consumata (61,8%).

Analizzando con i metodi Eco-indicator 99 ed EDIP 2003 gli impatti associati al ciclo di vita dell'edificio si è potuto evidenziare come la fase di pre uso sia la più rilevante in quasi tutte le categorie di impatto ambientale.

Per quanto riguarda i materiali da costruzione impiegati nella fase di pre uso, è emerso il ruolo preponderante del cemento nel bilancio energetico ( $3,4 \text{ GJ/m}^2$ ) ed ambientale (28,7 Pt) esteso all'intero ciclo di vita dell'edificio.

L'impianto idrico-sanitario è risultato essere il più impattante, in termini energetici, tra gli impianti mentre, in termini di impatti ambientali, l'impianto elettrico è risultato essere il più rilevante.

È stato possibile evidenziare come i processi di riciclo e riuso dei materiali derivanti dalla demolizione selettiva dell'edificio, permettono di ottenere significativi benefici ambientali nella fase di fine vita.

L'analisi degli impatti relativi all'installazione di un impianto fotovoltaico, oltre a mettere in evidenza ulteriormente lo spostamento della rilevanza reciproca delle fasi del ciclo di vita dell'edificio, ha permesso di calcolare i benefici energetico-ambientali connessi a tale intervento.

L'analisi del ciclo di vita si è confermata un affidabile strumento per la valutazione oggettiva della reale sostenibilità di un edificio: consente di evidenziare le criticità ambientali nella scelta dei materiali per l'involucro e per gli impianti, calcolandone l'energia incorporata e il loro diverso contributo all'impatto globale; in questo modo è possibile comparare diversi componenti edilizi ed impiantistici, valutare i reali benefici ambientali di soluzioni progettuali alternative, evitando che gli impatti semplicemente si spostino da una fase del ciclo di vita a un'altra.

Infine, si sottolinea come la disponibilità di una banca dati accessibile ed aggiornata dei materiali edilizi riferita al contesto italiano, permetterebbe di incrementare l'affidabilità e la significatività dei risultati ottenuti.

Inoltre un aumento del numero di casi studio relativi ad edifici collocati in Italia, consentirebbe una migliore comparabilità dei risultati e la definizione di benchmark di sostenibilità ambientale degli edifici a livello nazionale.

# Appendice

Per ogni processo, si riporta una breve descrizione con informazioni ricavate dalla sezione “Documentazione” di SimaPro.

## **Acrylic binder, without water, in 34% solution state {RER}| acrylic binder production, product in 34% solution state | Alloc Def, S (Copia)**

Il processo di produzione è considerato con il consumo di materie prime, energia, infrastrutture e uso del territorio, nonché generazione di rifiuti solidi e di emissioni in aria e acqua. Il trasporto delle materie prime e dei rifiuti solidi è incluso. Nessun sottoprodotto è generato nel processo.

Trasporti e consumi relativi agli ausiliari non sono inclusi a causa della mancanza di dati. Il trasporto e lo stoccaggio del prodotto finito non sono inclusi. La produzione è riferita a condizioni stabili; non sono considerate operazioni transitorie o non stabili.

Le emissioni in aria sono considerate come emesse in area densamente popolata. Le emissioni in acqua sono considerate emesse nei fiumi. I rifiuti solidi si ipotizza siano destinati a incenerimento di rifiuti pericolosi.

L’inventario si riferisce a 1 kg di vernice acrilica 100%. La fonte per i dati di letteratura è Von Däniken et al. 1995 ed è basata su informazioni fornite da industrie europee. Non sono disponibili ulteriori informazioni sulla collocazione e le caratteristiche di tali industrie.

Il processo originale è stato modificato sostituendo nella categoria tipo di rifiuto “non definito” con “plastics”.

## **Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RER}| acrylic varnish production, product in 87.5% solution state | Alloc Def, S**

Il processo di produzione è considerato con il consumo di materie prime, energia, infrastrutture e uso del territorio. Il trasporto delle materie prime è incluso. Nessun sottoprodotto è generato nel processo.

Trasporti e consumi relativi agli ausiliari, rifiuti solidi, emissioni in aria e acqua non sono inclusi a causa della mancanza di dati. Il trasporto e lo stoccaggio del prodotto finito non sono inclusi. La produzione è riferita a condizioni stabili; non sono considerate operazioni transitorie o non stabili.

La fonte per i dati di letteratura è Von Däniken et al. 1995 ed è basata su informazioni fornite da industrie di collocazione non nota.

**Aluminium, wrought alloy {RER} | aluminium production, primary | Alloc Def, S**

Processi inclusi: produzione di lingotti di alluminio da fusione, trasporto di materiali all'impianto e smaltimento dei rifiuti. I dati derivano da alcuni database svizzeri.

Tecnologia: tecnologia media per l'alluminio prodotto in Europa.

**Base plaster {CH} | production | Alloc Def, S (Copia)**

Processi inclusi: intero processo di produzione dell'intonaco di base (fornitura di materie prime, miscelazione di materie prime, imballaggio e stoccaggio), trasporti per impianti, infrastrutture. Non sono stati presi in considerazione altri edifici e l'uso del terreno in quanto si presume che il processo di miscelazione avvenga in un edificio esistente dell'industria della sabbia/cemento o sul sito di costruzione

I materiali grezzi sono miscelati secondo i seguenti rapporti: 0,722 kg di sabbia, 0205 kg di cemento, 0,023 kg di calce di cemento, 0,0002 kg di additivi. Dopo il miscelamento il materiale è trasportato all'interno dello stabilimento per essere confezionato.

Per l'uso devono essere aggiunti 0,082 kg di acqua (non compresi nel processo).

Non vengono prese in considerazione emissioni di processo dirette in quanto sono meno significative rispetto alle emissioni legate alla produzione di materie prime (ad esempio essiccazione della sabbia di silice) e poiché non sono disponibili dati.

Per l'inventario delle infrastrutture è assunta una produzione annua di 150 000 tonnellate. La vita utile dei macchinari è assunta pari a 20 anni. La quantità di materie prime e le distanze per i trasporti sono stimate.

Il processo originale è stato modificato sostituendo nella categoria tipo di rifiuto "non definito" con "cement".

**Brass {CH} | production | Alloc Def, S**

Processi inclusi: fusione di rame e zinco e produzione di lingotti di ottone (70% di rame e 30% di zinco). Tutti i dati sono calcolati in base ad ipotesi e modelli teorici. La qualità complessiva dei dati è considerata bassa. I dati di produzione si riferiscono alla media europea.

I trasporti degli input si riferiscono alla Svizzera.

Tecnologia: assunto mix energetico per la fusione. Ipotizzato abbattimento delle emissioni atmosferiche



### **Brick {RER} | production | Alloc Def, S**

I dati si riferiscono alla produzione di 1 kg di mattoni e sono stati adattati da valori presenti in letteratura (dati medi da 12 aziende svizzere). Non è previsto uso di carbone coke nell'impianto.

Processi inclusi: primo processo di macinazione, processo a umido (seconda macinazione, miscelamento e plastificazione), stoccaggio, formatura (per estrusione), taglio, essiccazione, cottura, carico, imballaggio e stoccaggio.

Non considera le acque reflue e i rifiuti solidi. Assume che il calore in eccesso sia utilizzato per l'essiccazione.

I dati provengono da Germania, Svizzera, Austria.

Tecnologia: mix di differenti tecnologie (differenti combustibili per la cottura).

### **Cement cast plaster floor {CH} | production | Alloc Def, S**

Comprende i seguenti processi: miscelamento delle materie prime (cemento Portland, sabbia e acqua), posa (tramite pompa o secchio), battitura e finitura. Sono inclusi anche alcuni trasporti ed infrastrutture.

Non sono considerati residui solidi e acque reflue. Per il cemento si considera "portland cement, strength class Z 42.5, at plant"; Tecnologia: tipica tecnologia per la produzione svizzera.

### **Cement mortar {CH} | production | Alloc Def, S**

Include l'intero processo di produzione di malte cementizie (fornitura di materie prime, miscelazione di materie prime, imballaggio e stoccaggio), trasporti e infrastrutture. Non sono stati presi in considerazione edifici aggiuntivi e l'uso del terreno in quanto si presume che il processo di miscelazione avvenga in un edificio esistente dell'industria della sabbia/cemento o sul sito di costruzione.

Le materie prime vengono miscelate in un determinato rapporto, trasportate nell'impianto di imballaggio e imballate. Non vengono prese in considerazione emissioni di processo dirette in quanto sono meno significative rispetto alle emissioni legate alla produzione di materie prime (ad esempio essiccazione della sabbia di silice) e poiché non sono disponibili dati. Si presume una produzione annua di 150.000 tonnellate di un produttore austriaco. Si presuppone una durata di vita per i macchinari di 20 anni.

I trasporti sono basati su distanze medie relative a quattro aziende svizzere.

**Cement, pozzolana and fly ash 36-55%, non-US {CH} | cement production, pozzolana and fly ash 36-55%, non-US | Alloc Def, S**

Il processo descrive la produzione del cemento in Europa, con riferimento ad un volume produttivo di 1605000 t.

Il gesso è ipotizzato essere ricavato dal trattamento di fumi di combustione.

Non sono inclusi il confezionamento e l'amministrazione.

**Ceramic tile {CH} | production | Alloc Def, S**

Processi inclusi: produzione di piastrelle in ceramica, compresi trasporti di materie prime in fabbrica.

Dati di un solo produttore, si riferiscono a ceramiche ossidiche. Dati italiani.

Tecnologia: produzione monocottura su larga scala in Europa. Forno a gas.

**Copper {RER} | production, primary | Alloc Def, S**

Processi inclusi: trasporto del metallo primario in Europa dai paesi che importano in Europa.

Come modello di importazione è stata scelta la situazione della Germania nel 1994.

È progettato per l'uso delle varie applicazioni tecniche del metallo come leghe e materiale da costruzione.

Tecnologia: tecnologia utilizzata dai paesi importatori in Germania nel 1994 e differenziata tra processi pirolitici, processi idrolitici e rame secondario.

Volume produttivo: 1,5 milioni di tonnellate (1994).

**Cork slab {RER} | production | Alloc Def, S (Copia)**

Processi inclusi: input di materiali ed energia per il processo di produzione, trasporto dei materiali di input, emissioni di processo disponibili.

Questo prodotto in sughero viene utilizzato ad esempio come sottofondo per pavimenti galleggianti o come materiale isolante.

I dati si riferiscono ad un grande produttore collocato in Portogallo.

Tecnologia: mix di fabbricazione continua e fabbricazione in stampi.

Il processo originale è stato modificato sostituendo nella categoria tipo di rifiuto "compost" con "wood".

**Electricity, low voltage {IT} | market for | Alloc Def, S**

Questo processo descrive la distribuzione di energia elettrica a bassa tensione in Italia.

I dati relativi alla produzione di energia elettrica annuale sono ricavati da statistiche IEA/OECD.

Sono inclusi nel processo: produzione elettrica nazionale, importazioni e trasformazione in bassa tensione; rete di trasmissione; emissioni dirette in aria; perdite elettriche di trasmissione.

**Excavation, hydraulic digger {RER} | processing | Alloc Def, S**

Questo processo si basa sui dati contenuti nel report “Oekoinventare von Energiesystemen 1996”. I consumi di gasolio e le relative emissioni sono stati aggiornati usando il database svizzero "Offroad database" con riferimento all'anno 2000.

Comprende: escavatore idraulico, olio lubrificante, consumo di combustibile ed alcune emissioni misurate.

**Excavation, skid-steer loader {RER} | processing | Alloc Def, S**

Questo processo si basa sui dati contenuti nel report “Oekoinventare von Energiesystemen 1996”. I consumi di gasolio e le relative emissioni sono stati aggiornati usando il database svizzero "Offroad database" con riferimento all'anno 2000.

Comprende: pala meccanica, olio lubrificante, consumo di combustibile ed alcune emissioni misurate.

**Flat glass, coated {RER} | production | Alloc Def, S**

Processi inclusi: tutti i materiali in entrata e in uscita e i vettori energetici relativi ad un impianto tedesco durante l'operazione di produzione del vetro rivestito (processo di rivestimento, trasporto interno, imballaggio e amministrazione).

Tutti i dati sono basati sul report ambientale dell'azienda “Interpane” (Germania) per l'anno 2000.

Per il trattamento di polverizzazione catodica sono usati bismuto, argento e nickel-cromo. Solo il nickel-cromo è modellato per assenza di dati relativi ad argento e bismuto nel database. Tecnologia: il rivestimento metallico è applicato sul vetro mediante polverizzazione catodica nel vuoto.

**Gravel 2/32, wet and dry quarry, production mix, at plant, undried RER S (Copia)**

I dati, di buona qualità complessiva, si riferiscono a tutti i processi e alle tecnologie rilevanti della produzione di sabbia secondo un'ottica “dalla culla al cancello”.

L'inventario è principalmente basato su dati delle industrie e completato, dove necessario, con dati secondari.

Il processo originale è stato modificato sostituendo nella categoria tipo di rifiuto “non definito” con “ceramics”.

### **Gypsum stone (CaSO<sub>4</sub>-dihydrate) DE S (Copia)**

I dati, di buona qualità complessiva, si riferiscono a tutti i processi e le tecnologie rilevanti della produzione di gesso secondo un'ottica “dalla culla al cancello”.

Il processo descrive la produzione del solfato di calcio diidrato in miniere a cielo aperto in Germania.

Il processo originale è stato modificato sostituendo nella categoria tipo di rifiuto “non definito” con “cement”.

### **Inverter, 2.5kW {RER} | production | Alloc Def, S**

Questo processo descrive la produzione di un inverter da 2500 W per impianti fotovoltaici. L'inverter presenta un'efficienza del 93,5% (efficienza totale che include l'inseguimento MPP) ed un peso di circa 18,5 kg.

Sono inclusi i consumi elettrici per la produzione, l'imballaggio e lo smaltimento a fine vita.

### **Kraft paper, unbleached {RER} | production | Alloc Def, S**

Processi inclusi: produzione europea di carta kraft non sbiancata in un'industria cartiera, compresi i trasporti alla cartiera, la movimentazione del legno, dissoluzione chimica, produzione carta, produzione di energia sul posto e trattamento interno delle acque reflue.

I dati derivano da un produttore europeo e da un database finlandese usato come database medio europeo.

### **Natural stone plate, cut {CH} | production | Alloc Def, S (Copia)**

Processi inclusi: estrazione dei massi mediante aria compressa prodotta con elettricità; taglio mediante sega a filo diamantato; trasporti all'interno della miniera, stoccaggio e macchinari.

Non sono considerate attività di amministrazione, usura dei macchinari, pezzi di ricambio e trattamento delle acque reflue. Le perdite nel filo diamantato (che potrebbero essere significative) non vengono prese in considerazione, in quanto non sono disponibili dati sulla produzione di diamanti.

Le emissioni di polveri sono stimate in base alle perdite che si hanno tagliando una lastra con geometria 0,5x0,5x0,03 m e un peso di 20 kg. Si presume che il 95% della polvere generata sia assorbita nell'acqua di raffreddamento.

Tecnologia: tecnologia tipica per la produzione svizzera media.

Il processo originale è stato modificato sostituendo nella categoria tipo di rifiuto “non definito” con “ceramics”.

### **Oriented strand board, OSB III, production mix, at plant, 4,8% water content EU-27S**

L'OSB descritto in questo processo è costituito da tre strati di lamelle di legno, prevalentemente pino ed abete rosso. Le lamelle hanno una lunghezza da 10 a 15 cm ed una larghezza da 2 a 3 cm.

Gli strati di legno vengono riscaldati, pressati e tenuti insieme da una colla: per la parte centrale è utilizzata la colla MDI (metilen difenilisocianato), per lo strato superiore la colla MUPF (melamina-urea-fenolo-resina).

I dati si riferiscono a siti produttivi collocati in Europa.

### **Particle board, P5 (V100), production mix, at plant, 7,8% water content EU-27 S**

I dati, di buona qualità complessiva, si riferiscono a tutti i processi e alle tecnologie rilevanti della produzione di truciolato secondo un'ottica “dalla culla al cancello”.

L'inventario è principalmente basato su dati delle industrie e completato, dove necessario, con dati secondari.

Diverse tipologie di legno vengono ridotte in trucioli in una macchina tritratrice. I trucioli vengono essiccati in un essiccatore a cilindro e successivamente vengono incollati. In una pressa, i trucioli vengono riscaldati e pressati per formare pannelli primari. Questi sono poi tagliati nelle dimensioni desiderate ed infine levigati. I pannelli sono quindi impilati e sigillati con film in PE. I residui dalla produzione (ad esempio dalla levigatura e dalla rifilatura) vengono riutilizzati nel processo di produzione per la generazione di calore.

### **Photovoltaic panel, single-Si wafer {RER} | production | Alloc Def, S**

Questo processo descrive la produzione di pannello fotovoltaico in silicio monocristallino (224 Wp) costituito da 60 celle di dimensioni 15,6x15,6 cm.

Include: produzione delle celle, taglio delle pellicole, lavaggio del vetro, produzione del laminato, isolamento, telaio in alluminio, smaltimento a fine vita.

I dati si riferiscono ad impianti collocati in Europa occidentale.

**Polyethylene, high density, granulate {RER} | production | Alloc Def, S**

Dati aggregati per tutti i processi dall'estrazione di materie prime fino alla consegna nello stabilimento.

I dati derivano da eco-profilo di 24 industrie della plastica europee.

Non sono inclusi i valori per: rifiuti riciclabili, quantità di aria/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> consumata, emissioni non specificate di metalli in aria e in acqua, emissione di mercaptano in aria, emissioni non specificate di CFC/HCFC in aria, diossina nell'acqua.

Si presume che la quantità di "zolfo (legato)" sia inclusa nella quantità di petrolio.

Tecnologia: polimerizzazione da etilene a pressione e temperatura normali.

**Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {RER} | production | Alloc Def, S**

Processi inclusi: dati medi per la produzione di PET amorfo da glicole etilenico e PTA. I dati includono il materiale e il consumo di energia, i rifiuti e le emissioni in aria e in acqua. I parametri DOC, TOC, i trasporti e le infrastrutture sono stimati.

I dati sono basati su eco-profilo dell'industria europea della plastica.

**Polyethylene terephthalate (PET) granulate, production mix, at plant, bottle grade RER**

I dati relativi alla polimerizzazione e ai prodotti intermedi sono stati ricavati da numerosi produttori in Europa. I valori medi sono ottenuti sulla base della capacità produttiva delle aziende. I dati secondari sono stati ricavati dal database Boustead.

**Polystyrene, expandable {RER} | production | Alloc Def, S**

Dati aggregati per tutti i processi dall'estrazione di materie prime fino alla consegna nello stabilimento.

I dati derivano da eco-profilo di industrie della plastica europee.

Non sono inclusi i valori per: rifiuti riciclabili, quantità di aria/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> consumata, emissione non specificate di metalli in aria e in acqua, emissione di mercaptano in aria, emissioni non specificate di CFC/HCFC in aria, diossina nell'acqua.

Si presume che la quantità di "zolfo (legato)" sia inclusa nella quantità di petrolio.

I dati si riferiscono a 21 siti di produzione europei.

Tecnologia: produzione mediante polimerizzazione in sospensione di benzene ed etilene.

**Polystyrene foam slab {CH} | production, 100% recycled | Alloc Def, S**

Comprende i processi di triturazione e termoformatura per la produzione di EPS riciclato. I dati sono ricavati dall'azienda svizzera Swisspor Romandie SA.

L'EPS riciclato ha una densità di 28 kg/m<sup>3</sup> e una conducibilità termica di 0,036 W/mK.

**Polystyrene foam slab {RER} | production | Alloc Def, S**

Processi inclusi: produzione e termoformatura di EPS. La lastra in EPS ha una densità di 30 kg/m<sup>3</sup> e una conducibilità termica di 0,035-0,04 W/mK.

Tecnologia: produzione europea di EPS; termoformatura da due industrie svizzere.

**Polyvinylidenechloride, granulate {RER} | production | Alloc Def, S**

Dati aggregati per tutti i processi dall'estrazione di materie prime fino alla consegna nello stabilimento. I dati derivano da eco-profil di 4 industrie della plastica europee.

Non sono inclusi i valori per: rifiuti riciclabili, quantità di aria/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> consumata, emissioni non specificate di metalli in aria e in acqua, emissione di mercaptano in aria, emissioni non specificate di CFC/HCFC in aria, diossina nell'acqua. Si presume che la quantità di "zolfo (legato)" sia inclusa nella quantità di petrolio.

**Reinforcing steel {RER} | production | Alloc Def, S**

Processi inclusi: mix di produzione di differenti acciai e laminazione a caldo.

Rappresenta una media dei processi di produzione a livello mondiale ed europeo. I dati si riferiscono ad impianti in Europa.

**Rock wool {CH} | production | Alloc Def, S (Copia)**

Processi inclusi: fusione, formatura e raccolta della fibra, forno di indurimento e processi interni (officina, ...). Sono inclusi anche il trasporto di materie prime ed il vettore energetico per la fornace. Non sono inclusi l'amministrazione, l'imballaggio e le infrastrutture.

I dati provengono da una società situata in Svizzera (Flumroc AG).

Tecnologia: l'azienda lavora su un livello tecnicamente molto alto. Il combustibile per il processo di fusione è il coke. La fornace è un forno da fusione a cupola. Le emissioni sono ridotte dalla post-combustione con recupero di energia. La suddivisione delle emissioni totali di polveri nelle categorie di particolato si basa su un processo EPA del 1998 che rappresenta solo parzialmente questo caso.

Il processo originale è stato modificato sostituendo nella categoria tipo di rifiuto "non definito" con "others".

**Sanitary ceramics {CH} | production | Alloc Def, S**

Dati ricavati da un unico produttore collocato in Austria, si riferiscono a ceramica ossidica.

Tecnologia: produzione europea su larga scala; forno a gas.

**Spruce wood, timber, production mix, at saw mill, 40% water content DE S**

I dati, di buona qualità complessiva, si riferiscono a tutti i processi e alle tecnologie rilevanti della produzione di sabbia secondo un'ottica "dalla culla al cancello".

L'inventario è principalmente basato su dati delle industrie e completato, dove necessario, con dati secondari. Il legno, di diverse dimensioni, viene scortecciato, tagliato, smistato e infine imballato. È ipotizzata una distanza media tra foresta e stabilimento di lavorazione di 144 km.

**Steel, chromium steel 18/8 {RER} | steel production, converter, chromium steel 18/8 | Alloc Def, S**

Descrive la produzione di acciaio primario. I rottami sono utilizzati solo per raffreddare l'acciaio liquido. Processi inclusi: trasporto metallo fuso ed altri materiali, fusione.

I dati si riferiscono ad impianti collocati in Europa.

Tecnologia: mix di tecnologia europea (principalmente convertitore LD).

**Steel, low-alloyed {RER} | steel production, converter, low-alloyed | Alloc Def, S**

Processi inclusi: trasporto del metallo fuso e di altri materiali di input al convertitore, produzione acciaio e fusione. Questo processo produce acciaio primario. I rottami ferrosi sono usati solo per raffreddare l'acciaio liquido.

I dati si riferiscono ad impianti collocati in Europa.

Tecnologia: mix di tecnologie europee (principalmente convertitore LD).

**Wood wool {RER} | production | Alloc Def, S**

Processi inclusi: tutti i processi industriali relativi alla produzione di lana di legno da conifere (tronchi scortecciati), compresa l'essiccazione all'aria (da u=70% a u=20%), trasporti interni ed esterni, aspirazione, compressione dell'aria, produzione di segheria.

Si riferisce a lana di legno di alta qualità priva di impurità. I dati provengono da un unico stabilimento svizzero per la produzione di lana di legno.



# Bibliografia

- [1] Scipioni A. et al. (2011), *La valutazione dell'impatto ambientale di prodotti e processi nell'interesse del loro ciclo di vita*, Consorzio Inca.
- [2] Rigamonti L., Fedele A. (2017), *L'analisi del ciclo di vita nel settore dei rifiuti: l'importanza di un solido approccio metodologico*, Ledizioni.
- [3] Cellura M. et al. (2017), *Life Cycle Assessment applicata all'edificio*, Editoriale Delfino.
- [4] Lavagna M. (2011), *Life Cycle Assessment in edilizia: lo stato dell'arte in Italia*, Enea.
- [5] Campioli A. et al. (2014), *Sostenibilità in edilizia - Soluzioni tecniche a confronto*, Ytong.
- [6] Humbert S. et al. (2007), *Leadership in Energy and Environmental Design (LEED). A critical evaluation by LCA and recommendations for improvement*, International Journal of Life Cycle Assessment.
- [7] Ganassali S. et al. (2016), *Valutazione LCA all'interno dei protocolli ambientali multicriteri per il settore edile delle costruzioni*, Enea.
- [8] Kotaji et al. (2003), *Life-cycle Assessment in Building and Construction: a state of the art*, Report SETAC.
- [9] Neri P. (2008), *Verso la valutazione ambientale degli edifici*, Alinea Editrice.
- [10] Blengini G. et al. (2007), *Valutazione della sostenibilità ambientale di una casa a basso consumo energetico con metodologia LCA*, DITAG Politecnico di Torino.
- [11] Studio Roatta Architetti Associati, *Buone pratiche in campo energetico finanziate dalla Regione Piemonte*, Settore politiche energetiche Regione Piemonte.
- [12] Di Andrea F., Danese A. (2004), *Misure dei consumi di energia elettrica nel settore domestico*, eERG – Politecnico di Milano.
- [13] S. P. Borg, N. J. Kelly (2011), *The effect of appliance energy efficiency improvements on domestic electric loads in European households*, Energy and Buildings.
- [14] Favi C. et al. (2018), *Comparative life cycle assessment of cooking appliances in Italian kitchens*, Journal of Cleaner Production.
- [15] Paleari M. et al (2016), *The assessment of the relevance of building components and life phases for the environmental profile of nearly zero-energy buildings: life cycle assessment of multifamily building in Italy*, The International Journal of Life Cycle Assessment.

- [16] Commissione Europea (2007), *A lead market initiative for Europe*.
- [17] Commissione Europea, *Sustainable construction final report*.
- [18] Commissione Europea (2007), *A lead market initiative for Europe. Explanatory Paper on the European Lead Market Approach: Methodology and Rationale*.
- [19] *Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione)*.
- [20] *Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica*.
- [21] Sartori I., Hestnes A. G. (2006), *Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: a review article*, Energy and Buildings.
- [22] C. K. Anand, B. (2016) *Amor, Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [23] M. Optis, P. M. Wild (2010), *Inadequate documentation in published life cycle energy reports on buildings*, The International Journal of Life Cycle Assessment.
- [24] G. Verbeeck, H. Hens (2010), *Life cycle inventory of buildings: A contribution analysis*, Building and Environment.
- [25] S. Citherlet, T. Defaux (2007), *Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span*, Building and Environment.
- [26] R. M. Cuellar-Franca, A. Azapagic (2012), *Environmental impacts of the UK residential sector: life cycle assessment of houses*, Building and Environment.
- [27] S. Proietti et al. (2013), *Life Cycle Assessment of a passive house in a seismic temperate zone*, Energy and Buildings.
- [28] M. Cellura et al. (2013), *Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study*, Energy and Buildings.
- [29] Paleari et al. (2016), *The assessment of the relevance of building components and life phases for the environmental profile of nearly zero-energy buildings: life cycle assessment of a multifamily building in Italy*, The International Journal of Life Cycle Assessment.
- [30] M. Lavagna et al. (2016), *Abitare in Europa. Analisi dei dati statistici, definizione di modelli rappresentativi e valutazione ambientale LCA del patrimonio residenziale europeo*, Maggioli.
- [31] Gestore Servizi Energetici (2016), *Rapporto statistico fotovoltaico*.
- [32] S. Demattè et al. (2013), *BENIMPACT Suite: a tool for ZEB whole life cycle analysis*, Atti IBPSA Italy conference.
- [33] UNI (2006), *Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento*, Norma UNI EN ISO 14040, Ente Italiano di Normazione.

- [34] Verdaguer B. S. et al. (2016), *Simplification in life cycle assessment of single-family houses: A review of recent developments*, Building and environment.
- [35] UNI (2010), *Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della sostenibilità degli edifici - Parte1: Quadro di riferimento generale*, Norma UNI EN 15643-1, Ente Italiano di Normazione.
- [36] Zanolli et al. (2007), *Conceptual Framework on the Assessment of the Impact of Organic Agriculture on the Economies of Developing Countries*, Università Politecnica delle Marche.
- [37] UNI (1994), *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici*, Norma UNI 10349, Ente Italiano di Normazione.
- [38] UNI (2008), *Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto - Parte 4-3: Sistemi di generazione del calore, sistemi solari termici*, Norma UNI EN 15316-4-3, Ente Italiano di Normazione.
- [39] De Pasqual M. (2016), *Effetto della procedura di allocazione negli studi LCA: il caso degli edifici temporanei*, Politecnico di Milano.
- [40] Verdaguer B. S. et al. (2017), *Critical review of Bim-based LCA method to buildings*, Energy and Building.
- [41] Peishi W. (2017), *Review on Life Cycle Assessment of Energy Payback of Solar Photovoltaic Systems and a Case Study*, Energy Procedia.
- [42] Ministero dello Sviluppo Economico (2015), *Decreto requisiti minimi – Allegato 1: Criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici*.